

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**PASLANMAZ ÇELİK BİLYA VE CAM KÜRE İLE BİLYALI  
DÖVÜLEN AA7075 ALAŞIMININ YÜZEY VE YÜZEY ALTI  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**OKAN YETİK**

**KOCAELİ 2020**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**PASLANMAZ ÇELİK BİLYA VE CAM KÜRE İLE BİLYALI**  
**DÖVÜLEN AA7075 ALAŞIMININ YÜZEY VE YÜZEY ALTI**  
**ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**OKAN YETİK**

**Doç.Dr. Egemen AVCU**

**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Doç.Dr. Rıdvan YAMANOĞLU**

**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Dr.Öğr. Üyesi Fikret SÖNMEZ**

**Jüri Üyesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi**

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 31.08.2020**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bilyalı dövme işlemi küresel morfolojili ve yüksek sertlikteki bilyaların malzeme yüzeyine yüksek hızlarla ve tekrarlı olarak çarptırılması ile metal ve alaşımlarının yüzey özelliklerinin geliştirilmesini esas alan mekanik bir yüzey işleme yöntemidir. Bilyalı dövme işlemi metal ve alaşımlarının özellikle kalıntı basma gerilme, sertlik ve yüzey topografyası gibi yüzey ve yüzey altı özelliklerin modifiye edilmesini sağlar. Kolay uygulanabilirliği, düşük maliyetleri ve iyi bilinirliği nedeniyle özellikle yorulma dayanımı, aşınma dayanımı ve korozyon dayanımı gibi metal ve alaşımlarının yüzey ve yüzey altı özelliklerinin önemli olduğu endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilir. Havacılıkta ve otomotivde kullanılan alüminyum alaşımlarının bilyalı dövülmesi yaygın bir endüstriyel uygulamadır ancak alüminyum alaşımları, metal ve alaşımlarına göre düşük mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle bilyalı dövme işlemi sonrası yüzey ve yüzey altı özellikleri olumsuz etkilenebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, AA7075-T6 alaşımına paslanmaz çelik bilyalar ve alternatif olarak cam küreler ile farklı medya boyutlarında ve püskürtme basınçlarında bilyalı dövme işlemleri uygulanarak medya türünün, medya boyutunun ve püskürtme basıncının AA7075-T6 alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkisi derinlemesine incelenmiştir.

Akademik kariyerimin ilk gününden beri yanımda olan, kıymetli bilgi birikimi, eşsiz motivasyonu ve vizyonu ile bana yol gösteren, duruşu ve kişiliği ile hayatımın her alanında örnek aldığım, fikirlerine değer verdiğim, her zaman öz abim kadar kendime yakın hissettiğim değerli danışman hocam Doç. Dr. Egemen Avcu' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım kapsamındaki desteklerinden dolayı Mekanik Yüzey İşlemleri Laboratuvarımızın ekip üyelerinden Ahmet Burak Çubuk'a ve Berkay Gönül'e, laboratuvar yürütücüsü Doç. Dr. Egemen Avcu'ya ve Dr. Öğretim Üyesi Rıza Emre Ergün'e ve arka plandaki teknik desteği ile çalışmalarım emeği geçen Recep Usta'ya teşekkürlerimi sunarım.

2017/049 numaralı proje kapsamındaki desteklerinden dolayı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine ve bilyalı dövme çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Ford Otosan İhsaniye Otomotiv MYO' idari kadrosuna teşekkürlerimi sunarım.

Metalurjik karakterizasyon çalışmalarındaki desteği ve SEM analizleri için Dr. Fatih Erdem Baştan'a ve laboratuvar altyapısını kullanmama izin vererek çalışmalarına destek olan başta Prof. Dr. Fatih Üstel olmak üzere Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Bilyalı dövme çalışmaları kapsamında kullanılan CNC kontrollü bilyalı test düzeneğinin tasarım ve imalat çalışmalarındaki değerli katkılarından dolayı yakın

dostum Arş. Gör. Makine Yüksek Mühendisi Hürol Koçoğlu'na ve Anıt Otomasyon Sistemleri Şirketi Kurucularından Makine Mühendisi Kadir Numal'a teşekkürlerimi sunarım.

Birlikte pek çok çalışma gerçekleştirdiğimiz ve tez çalışmalarım kapsamında da bilgisi ve pozitif enerjisi ile her zaman yanımda olan değerli hocam ve arkadaşım Dr. Yasemin Yıldırın Avcu' ya teşekkürlerimi sunarım.

Bilime olan büyük tutkusu ve çalışma azmi ile her zaman beni motive eden tez çalışmalarım süresince hep yanımda olan sevgili dostum Taha Çapanoğlu' na teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde varlıklarıyla bana güç veren, verdikleri destek ve bana olan güvenleri ile karşılaştığım her türlü zorluğu aşmamı sağlayan, kardeşim Özden Yetik' e, annem Sadeet Yetik' e ve babam Faruk Yetik' e bana karşı gösterdikleri sevgi, sabır, güven, saygı ve taktirleri için teşekkürlerimi sunuyorum.

Ağustos – 2020

Okan YETİK

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER.....	i
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ .....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	ix
ÖZET.....	xi
ABSTRACT .....	xi
GİRİŞ .....	1
1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN MEKANİK YÜZEY İŞLEMLERİ .....	3
1.1. AA7xxx Serisi .....	4
1.2. Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerle İlgili Sınırlamalar .....	4
1.3. Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesinde Kullanılan Metotlar .....	5
2. BİLYALI DÖVME .....	10
2.1. Bilyalı Dövme İşleminin Metal ve Alaşımlarının Özelliklerine Etkisi .....	11
2.2. Bilyalı Dövmenin Metal ve Alaşımlarının Performansına Etkisi .....	15
2.3. Bilyalı Dövme İşlem Parametreleri .....	17
3. AA7075 ALAŞIMLARININ BİLYALI DÖVÜLMESİ ÜZERİNE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR .....	20
3.1. Bilyalı Dövme İşleminin Yüzey Sertliğine ve Topografyaya Etkisi.....	20
3.2. Bilyalı Dövme İşleminin Kesit Sertliğine Etkisi .....	22
3.3. Literatür Çalışmalarının Nihai Sonuçları .....	24
4. MALZEME VE YÖNTEM.....	25
4.1. Malzeme .....	26
4.1.1. Alüminyum alaşımı numuneler.....	26
4.1.2. Bilyalar .....	26
4.2. Yöntem .....	29
4.2.1. Bilyalı dövme işlemleri .....	29
4.2.2. Kütle kaybı ölçümleri.....	30
4.2.3. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri.....	30
4.2.4. Metalografik hazırlık.....	31
4.2.5. Kesit mikro sertlik incelemeleri .....	31
4.2.6. Mikroyapısal ve morfolojik incelemeler.....	32
5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	33
5.1. Bilyalı Dövme Sonrası Kesit Özelliklerinin İncelenmesi .....	33
5.1.1. Bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altı sertliğin değişimi.....	33
5.1.2. Bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altı mikroyapısının değişimi .....	40
5.2. Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi .....	46
5.2.1. Bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi.....	46
5.2.2. Bilyalı dövme sonrası kütle kaybının incelenmesi .....	50
5.2.3. Bilyalı dövme sonrası yüzey morfolojisinin incelenmesi .....	56

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	61
KAYNAKLAR .....	64
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	73
ÖZGEÇMİŞ .....	75



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Boeing 747, 777, 787 ve 737 serisi uçaklarda kullanılan yapı malzemelerinin uçak modellerine göre yüzdelik dağılımı .....	3
Şekil 1.2.	Mekanik yüzey işlemleri, a) bilyalı dövme, b) soğuk derin haddeleme, c) ultrasonik dövme, d) lazer dövme, e) su jeti ile dövme, f) vibrasyon ile dövme.....	6
Şekil 1.3.	Mekanik yüzey işlemlerinin genel konsepti ve metal ve alaşımlarının özelliklerine etkilerinin ilişkisinin şematik gösterimi .....	7
Şekil 1.4.	Paslanmaz çelik malzemede yüzey altı kalıntı basma gerilmesi miktarı ve etki derinliğinin farklı mekanik yüzey işlemlere (bilyalı dövme, lazer dövme, kavitasyon dövme) göre değişimi.....	8
Şekil 1.5.	Farklı mekanik işleme yöntemleri sonrasında elde edilen maksimum pekleşme miktarları ve etki derinliği ilişkisi.....	9
Şekil 2.1.	Bir dişli parçasına uygulanan bilyalı dövme uygulaması.....	10
Şekil 2.2.	Bilyalı dövme uygulamalarında kullanılan farklı bilyalı dövme cihazı sistemleri, a) döner disk, b) basınçlı hava, c) vakum enjektör nozul, d) yerçekimli enjektör nozul.....	11
Şekil 2.3.	Metal ve alaşımlarının yüzey ve yüzey altı özelliklerinin bilyalı dövme işlemine bağlı değişimi.....	12
Şekil 2.4.	Bilyalı dövme işlemi sonrası metal ve alaşımlarının yüzey ve yüzey altı özelliklerinin değişimi.....	12
Şekil 2.5.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövülmesi sonrası değişen yüzey mikroyapısı ve tane boyutu ile ilgili bir EBSD çalışması .....	13
Şekil 2.6.	Bilyalı dövme ile metal ve alaşımlarının yüzey altı kalıntı basma gerilmesi gelişimi .....	14
Şekil 2.7.	Bilyalı dövme sonrası AISI 304 çeliğinde deformasyona bağlı artan dislokasyon yoğunluğunun geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü.....	15
Şekil 2.8.	Bilyalı dövme işlemine etki eden parametrelerin genel görünümü.....	18
Şekil 2.9.	Bilya dövme işlemlerinde kullanılan medya türleri .....	18
Şekil 3.1.	Farklı yüzey işlemleri ve bilyalı dövme parametrelerinin AA7075-T6 alaşımının yüzey topografyasına etkileri, a) B120 zirkonya bilya ile bilyalı dövme, b) B120 zirkonya bilya ile bilyalı dövme ve tribofinish yüzey işlemi, c) V40 cam küre ile bilyalı dövme, d) V40 cam küre ile bilyalı dövme ve tribofinish yüzey işlemi .....	21
Şekil 3.2.	Farklı bilyalı dövme işlemleri sonrası yüzey altı kalıntı gerilme ve sertlik değişimleri a) kesit kalıntı gerilme, b) kesit sertlik .....	22
Şekil 3.3.	AA7xxx alaşımların farklı bilyalı dövme parametrelerine bağlı (medya türü, boyutu, bilyalı dövme şiddeti ve doyurma oranı) kesit mikro yapısının değişimini gösteren SEM görüntüsü, a) 8.3N/100% dövülen malzeme kesit mikro yapısı 1kx büyütme, b) 8.3N/100% dövülen malzeme kesit mikro yapısı 2kx büyütme, c) 14.4A/100% dövülen malzeme kesit mikro yapısı 1kx büyütme, d) 14.4A/100% dövülen malzeme kesit mikro yapısı 1kx büyütme .....	23

Şekil 4.1.	Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların akış şeması.....	25
Şekil 4.2.	Bilyalı dövme çalışmalarında kullanılan bilyaların stereo mikroskop görüntüleri; a) Chronital S10 paslanmaz çelik bilyalar (50-200 µm) b) Chronital S60 paslanmaz çelik bilyalar (700-1200 µm).....	28
Şekil 4.3.	Bilyalı dövme çalışmalarında kullanılan bilyaların stereo mikroskop görüntüleri; a) G10 (70-110 µm) cam küreler, b) G35 (300-400 µm) cam küreler .....	29
Şekil 4.4.	Bilyalı dövme işlemleri için kullanılan özel tasarlanmış CNC kontrollü bilyalı dövme test sistemi şematik gösterimi.....	30
Şekil 4.5.	Yüzey pürüzlülüğü ölçüm metodolojisi şematik gösterimi.....	31
Şekil 4.6.	Kesit Vickers mikro sertlik ölçümü metodolojisi şematik gösterimi, a) Kesit yüzeyinden ölçüm alınan bölgenin şematik gösterimi, b) Numune yüzeyinden merkezine doğru gerçekleştirilen ölçümlerin metodolojisinin şematik gösterimi .....	32
Şekil 5.1.	Farklı püskürtme basınçlarında paslanmaz çelik bilya (S60) ve cam küre (G35) ile bilyalı dövülen numunelerde sertliğin derinliğe bağlı değişimi, sabit dövme süresi (60 sn) ve sabit bilya çarpma açısı (90°) a) 2 bar, b) 7 bar .....	36
Şekil 5.2.	Farklı boyutlu paslanmaz çelik bilya (S10 ve S60) ve cam küre (G10 ve G35) ile bilyalı dövülen numunelerde sertliğin derinliğe bağlı değişimi, sabit dövme süresi (60 sn), püskürtme basıncı (7 bar) ve bilya çarpma açısı (90°), a) cam küre, b) paslanmaz çelik bilya.....	38
Şekil 5.3.	2 ve 7 bar püskürtme basınçlarında paslanmaz çelik bilya (S60) ve cam küre (G35) ile bilyalı dövülen numunelerin OM kesit mikroyapı görüntüleri sabit dövme süresi (60 sn) ve sabit bilya çarpma açısı (90°); a) 2 bar basınç – G35, b) 7 bar basınç – G35, c) 2 bar basınç – S60, d) 7 bar basınç – S60.....	41
Şekil 5.4.	Farklı boyutlu paslanmaz çelik bilya (S10 ve S60) ve cam küre (G10 ve G35) ile bilyalı dövülen numunelerin OM kesit mikroyapı görüntüleri sabit dövme süresi (60 sn), püskürtme basıncı (7 bar) ve bilya çarpma açısı (90°); a) G10, b) G35, c) S10, d) S60 .....	42
Şekil 5.5.	Tane boyutunun deformasyona bağlı değişimi OM görüntüsü (500x büyütme), S60 paslanmaz çelik medya, 2 bar püskürtme basıncı, 60 sn dövme süresi, 90° bilya çarpma açısı .....	43
Şekil 5.6.	Aşırı plastik deformasyon bölgesinde mikroyapının değişimi SEM görüntüsü (BSE modu), S60 paslanmaz çelik medya, 7 bar püskürtme basıncı, 60 sn dövme süresi, 90° bilya çarpma açısı; a) 500x büyütme, b) 1kx büyütme, c) 2.5kx büyütme, d) 5kx büyütme .....	44
Şekil 5.7.	Eğik açılı dövme işlemi sonrası kulak oluşumu mekanizmasının kesit OM (200x büyütme) görüntüsü, S60 paslanmaz çelik medya, 7 bar püskürtme basıncı, 60 sn dövme süresi, 30° bilya çarpma açısı .....	44
Şekil 5.8.	Aşırı bilyalı dövme sonrası yüzeyde poroz yapı oluşumu OM görüntüsü S60 paslanmaz çelik medya, 7 bar püskürtme basıncı, 60 sn dövme süresi, 90° bilya çarpma açısı; a) 200x büyütme, b) 500x büyütme .....	45
Şekil 5.9.	2 ve 7 bar püskürtme basınçlarında paslanmaz çelik bilya (S60, S10) ve cam küre (G35, G10) ile bilyalı dövülen numunelerde ortalama çizgisel yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri, sabit dövme süresi (60 sn) ve sabit bilya çarpma açısı (90°) .....	46



Şekil 5.10. Yüzey pürüzlülüğünün bilyalı dövme açısı ve bilya boyutuna bağlı değişimi, 7 bar püskürtme basıncı, 60 sn dövme süresi, 30° bilya çarpma açısı.....	50
Şekil 5.11. 2 ve 7 bar püskürtme basınçlarında paslanmaz çelik bilya (S60) ve cam küre (G35) ile bilyalı dövülen numunelerde kütle değişimi grafiği, sabit dövme süresi (60 sn) ve sabit bilya çarpma açısı (90°) .....	52
Şekil 5.12. G10 cam kürelerin bilyalı dövme öncesi ve sonrası stereo mikroskop görüntüleri (4x büyütme), a) dövme öncesi (kullanılmamış), b) dövme sonrası (dövme işlemlerinde kullanılmış) .....	52
Şekil 5.13. G35 cam kürelerin bilyalı dövme öncesi ve sonrası stereo mikroskop görüntüleri (3x büyütme), a) dövme öncesi (kullanılmamış), b) dövme sonrası (dövme işlemlerinde kullanılmış) .....	53
Şekil 5.14. S10 cam kürelerin bilyalı dövme öncesi ve sonrası stereo mikroskop görüntüleri (4x büyütme), a) dövme öncesi (kullanılmamış), b) dövme sonrası (dövme işlemlerinde kullanılmış) .....	53
Şekil 5.15. S60 cam kürelerin bilyalı dövme öncesi ve sonrası stereo mikroskop görüntüleri (1x büyütme), a) dövme öncesi (kullanılmamış), b) dövme sonrası (dövme işlemlerinde kullanılmış) .....	53
Şekil 5.16. Farklı dövme açılarında G10 ve G35 cam küre ile bilyalı dövülen numunelerde kütle değişimi grafiği, bilya püskürtme basıncı (2 ve 7 bar), sabit dövme süresi (60 sn) ve sabit bilya çarpma açısı (90°).....	55
Şekil 5.17. Farklı boyutlu paslanmaz çelik bilya (S10 ve S60) ve cam küre (G10 ve G35) ile bilyalı dövülen numunelerin yüzey topografyalarının SEM (x100, Mod:SE) görüntüleri, sabit dövme süresi (60 sn), bilya çarpma açısı (90°) a) G10 cam küre – 7 bar, b) G35 cam küre 7 bar, c) G35 cam küre 2 bar, d) S10 paslanmaz çelik bilya - 7 bar, e) S60 paslanmaz çelik bilya - 7 bar.....	57
Şekil 5.18. Farklı boyutlu paslanmaz çelik bilya (S10 ve S60) ve cam küre (G10 ve G35) ile bilyalı dövülen numunelerde meydana gelen deformasyon mekanizmalarının SEM (x500, Mod:SE) görüntüleri, sabit dövme süresi (60 sn), püskürtme basıncı (7 bar) ve bilya çarpma açısı (90°) a) G10 cam küre, b) G35 cam küre, c) S10 paslanmaz çelik bilya, d) S60 paslanmaz çelik bilya .....	58
Şekil 5.19. Cam küre ve paslanmaz çelik bilyalarda görülen temel deformasyon mekanizmalarının SEM görüntüleri (x1k, Mod: BSE), sabit dövme süresi (60 sn), püskürtme basıncı (7 bar) ve bilya çarpma açısı (90°) a) G35 cam küre, b) S60 paslanmaz çelik bilya.....	59
Şekil 5.20. Bilyalı dövme sonrası AA7075 malzeme yüzeyine gömülen cam parçalarının SEM (Mod:SE) görüntüleri, G35 cam küre sabit dövme süresi (60 sn), püskürtme basıncı (2 bar) ve bilya çarpma açısı (90°) a) x500 büyütme, b) x2,5k büyütme .....	59
Şekil 6.1. Bilyalı dövme sonrası medya türüne bağlı AA7075 alaşımının kesit sertliği ve yüzey pürüzlülüğü değişimi şematik gösterimi, 7 bar püskürtme basıncı, 60 sn dövme süresi 90° bilya çarpma açısı .....	61

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Bilyalı dövme ile değişen metal ve alaşımlarının özelliklerinin yorulma dayanımına etkisi .....	15
Tablo 4.1. Tez çalışmalarında kullanılan AA7075 alaşımının kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri.....	26
Tablo 4.2. Bilyalı dövme çalışmalarında kullanılan Chronital paslanmaz çelik bilyaların kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri.....	27
Tablo 4.3. Bilyalı dövme çalışmalarında kullanılan cam kürelerin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri.....	28
Tablo 4.4. Bilyalı dövme işlemlerinde kullanılan parametreler .....	29
Tablo 5.1. Literatürde AA7xxx serisi alaşımların kesit sertliği incelemeleri üzerine yapılan çalışmaların önemli noktaları .....	34

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Cu	: Bakır
V	: Bilya hızı
m	: Bilya kütlesi
Zn	: Çinko
Ra	: Çizgisel pürüzlülük
Fe	: Demir
P	: Fosfor
GPa	: Gigapaskal
g	: Gram
$\sigma_R$	: Kalıntı gerilme
C	: Karbon
kg	: Kilogram
Cr	: Krom
F	: Kuvvet
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
MPa	: Megapaskal
$\mu\text{m}$	: Mikrometre
ml	: Mililitre
mm	: Milimetre
nm	: Nanometre
Ni	: Nikel
HRC	: Rockwell sertlik
sn	: Saniye
cm	: Santimetre
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
HV	: Vickers sertlik
Zr	: Zirkonyum

### Kısaltmalar

AA	: Alüminyum Alaşımı
AISI	: American Iron And Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
APD	: Aşırı Plastik Deformasyon
BSE	: Back-Scatter Elektron (Geri Saçılan Elektron)
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayar Sayımlı Yönetim)
EBSD	: Electron Backscatter Diffraction (Elektron Geri Saçılımı Kırınımı)

EDS	:	Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)
KE	:	Kinetik Enerji
MYO	:	Meslek Yüksek Okulu
OM	:	Optical Microscopy (Optik Mikroskop)
PD	:	Plastik Deformasyon
SE	:	Secondary Electron (İkincil Elektron)
SEM	:	Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TEM	:	Transmission Electron Microscopy (Geçirimli Elektron Mikroskobu)



## PASLANMAZ ÇELİK BİLYA VE CAM KÜRE İLE BİLYALI DÖVÜLEN AA7075 ALAŞIMININ YÜZEY VE YÜZEY ALTI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

### ÖZET

Bu tez çalışmasında endüstriyel olarak yaygın kullanımı olan AA7075-T6 alüminyum alaşımı özel tasarım CNC bilyalı dövme test sistemi ile dövülerek alaşımın yüzey ve mekanik özelliklerinin farklı medya türüne, boyutuna (50-200  $\mu\text{m}$  (S10) ve 700-1200  $\mu\text{m}$  (S60) paslanmaz çelik bilyalar ve alternatif olarak 70-110  $\mu\text{m}$  (G10) ve 300-400  $\mu\text{m}$  (G35) cam küreler) ve püskürtme basıncına bağlı (2 ve 7 bar) olarak değişimi incelenmiştir. Her iki medya türünde de bilya boyutu ve bilya püskürtme basıncının yüzey altı sertlik değerlerini ve yüzey altı aşırı plastik deforme olmuş bölge derinliğini arttırdığı, kesit sertlik artışı derinliğinin 7 barda S60 bilyalarla 350-400  $\mu\text{m}$  ve 7 barda G35 kürelerle 300-350  $\mu\text{m}$  kadar ulaştığı tespit edilmiştir. En yüksek yüzey sertlik artışı (%22) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra, 6  $\mu\text{m}$ ) 7 barda S60 çelik bilyalarla gerçekleştirilen dövme işlemlerinde elde edilmiştir. 7 barda G35 küreler ile gerçekleştirilen dövme işlemlerinde dikkate değer kesit sertlik artışı (%14,28) ve düşük yüzey pürüzlülüğü (Ra, 4,5  $\mu\text{m}$ ) görülürken diğer test gruplarına göre 2-3 kat daha fazla kütle kaybı meydana gelmiştir. Genel olarak basınç artışının yüzey pürüzlülüğünü yaklaşık %50-100 oranında arttırdığı ancak G10 kürelerin basınç artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünü yaklaşık %700 oranında arttırdığı görülmüştür. Cam kürelerin alaşımın yüzeyinde yer yer kesme izlerine neden olsa da daha az yüzey deformasyonu oluşturduğu belirlenmiştir. Çelik bilyalar ile gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemlerinde ise aşırı deformasyon, katlanma ve kulak oluşumu gibi plastik deformasyon mekanizmalarının yoğun olduğu görülmüştür. Tez çalışması ile AA7075 alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerinin farklı bilyalı dövme parametreleri altında geliştirilebileceği, endüstriyel uygulamalarda cam kürelerin AA7075 alaşımının bilyalı dövülmesinde paslanmaz çelik bilyalara alternatif olarak kullanılabilmesi belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AA7075, Bilyalı Dövme, Medya Türü, Vickers Sertlik, Yüzey Pürüzlülüğü.

## **UNDERSTANDING SURFACE AND SUBSURFACE PROPERTIES OF AA7075 ALLOY SHOT PEENED BY STAINLESS STEEL SHOTS AND GLASS BEADS**

### **ABSTRACT**

In the present thesis, AA7075-T6 aluminium alloy, which is widely used in industrial applications, was shot peened by using a custom-design CNC shot peening system in order to examine the modification of surface and mechanical properties of the alloy depending on shot type, size (50-200  $\mu\text{m}$  (S10) and 700-1200 (S60)  $\mu\text{m}$  stainless shots and alternatively 70-110  $\mu\text{m}$  (G10) and 300-400  $\mu\text{m}$  (G35) glass beads) and acceleration pressure (2 and 7 bar). In both shot type, shot size and acceleration pressure influenced the subsurface hardness increment and the depth of severe plastic deformed zone. The depth of subsurface hardness increment was observed as 350-400  $\mu\text{m}$  and 300-350  $\mu\text{m}$  for S60 shots at 7 bar and G35 beads at 7 bar, respectively. The highest hardness increment (%22) and surface roughness (Ra, 6  $\mu\text{m}$ ) were obtained with S60 steel shots at 7 bar. Shot peening with G35 beads at 7 bar resulted in an increased cross-sectional hardness (%14.28) with low surface roughness (Ra, 4.5  $\mu\text{m}$ ), while weight loss was measured 2-3 times higher than other test groups. It was observed that the surface roughness increased in 1.5-2 times with increasing acceleration pressure yet G10 beads caused 8 times higher surface roughness with increasing acceleration pressure. Glass beads caused lower surface deformation although they caused local micro cutting marks on the surface. On the contrary, shot peening with steel shots caused various deformation mechanisms such as severe plastic deformation, folding, and ear formation. The present thesis revealed that the surface and subsurface properties of AA7075 alloy could be significantly improved by using shot peening under different parameters, and it was shown that glass beads would be used as an alternative to stainless steel shots in shot peening of AA7075 alloy.

**Keywords:** AA7075, Shot Peening, Shot Type, Vickers Hardness, Surface Roughness.

## GİRİŞ

AA7075 alaşımı güçlü mekanik özellikleri sayesinde özellikle otomotiv ve havacılık uygulamaları için yaygın olarak tercih edilen mühendislik alüminyum alaşımlarından biridir. Bilyalı dövme işlemi metal ve alaşımlarının yüzeylerine çok sayıda bilyanın yüksek hızlarda ve tekrarlı bir şekilde çarptırılması ile gerçekleştirilen mekanik bir yüzey işleme yöntemidir. Bilyalı dövme işlemi AA7075-T6 alaşımının yorulma dayanımının artırılması amacıyla endüstride yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

Bilyalı dövme işleminin metal ve alaşımlarının özelliklerine etkisi iki grup altında incelenebilir. (i) Yüzey altı özellikleri, dövme işlemi ile yakın yüzey altı bölgede aşırı plastik deforme olmuş ara bölge meydana gelir. Bu bölge yorulma yükü altında çalışan parçalarda, çatlak ilerleme hızını azaltmakta böylece malzemelerin yorulma ömrünün uzatılmasını sağlamaktadır. Ayrıca deformasyona bağlı oluşan pekleşme kritik çatlak başlangıcı direncini artırıcı yönde etki etmektedir. (ii) Yüzey özellikleri, bilyalı dövme işlemi ile yüzey pürüzlülüğü genellikle artmakta ve malzeme yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Öte yandan aşırı pekleşmeye bağlı meydana gelen gevrekleşme durumu çatlak ilerleme hızını artırıcı yönde etki etmektedir. Bu nedenle plastik deformasyon miktarının artırılmasının yanı sıra yüzey kalitesinin korunması bilyalı dövme işlemi ile malzeme performansının artırılması noktasında kritiktir.

Bilyalı dövme işlemi doğası gereği bir tekrarlı çarpma işlemi olarak dikkate alındığında hedef malzeme özellikleri kadar kullanılan medya türlerinin sahip olduğu farklı yoğunluklar, yüzey morfolojileri ve mekanik özelliklerin de bilyalı dövme sonrası malzeme yüzey ve yüzey altı özellikleri üzerinde önemli yeri olduğu görülmektedir ancak literatür çalışmaları incelendiğinde bilyalı dövme işlemlerinde ağırlıklı olarak paslanmaz çelik bilyaların kullanıldığı, cam küre gibi görece daha kusursuz yüzey morfolojisine sahip ve farklı mekanik özelliklerdeki medyaların AA7075 alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerinin modifikasyonuna etkilerinin derinlemesine incelenmediği görülmüştür. Öte yandan literatürde ağırlıklı olarak bilyalı dövme işleminin malzemelerin yorulma dayanımına etkileri üzerine çalışmalar

gerçekleştirildiği ancak malzeme performansını etkileyen yüzey pürüzlülüğü, çatlak oluşumu, kesit sertlik artışı gibi özelliklerin derinlemesine incelenmediği görülmüştür.

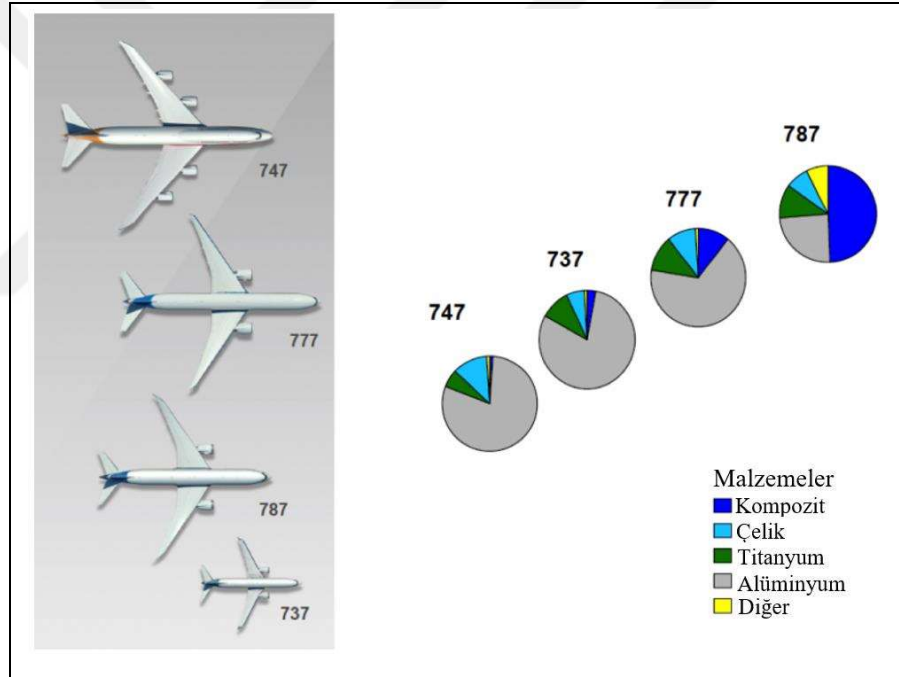
Bilyalı dövme işlemi pek çok faktörün ve operasyon parametresinin karmaşık bir sonucu olarak meydana gelse de özellikle malzeme yüzey ve yüzey altı özelliklerine etki eden parametrelerin bilya türü, boyutu, püskürtme basıncı ve yüzey doyurma oranı olduğu literatürde açık bir şekilde ortaya konmuştur. Bilyaların çarpma kinetik enerjisi ve bilyaların çarpma davranışları göz önüne alındığında, bilya türünün etkisinin derinlemesine anlaşılabilmesi amacıyla bilyalı dövme işleminin, bilya türünün yanı sıra bilya boyut ve püskürtme basıncının bir kombinasyonu olarak değerlendirilmesi gerektiği görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında AA7075-T6 alaşımına paslanmaz çelik bilyalar ve alternatif olarak cam küreler kullanılarak bilya türü, bilya boyutu ve bilya püskürtme basıncı parametrelerinin kombinasyonu ile bilyalı dövme işlemleri uygulanmıştır. Bilyalı dövülmüş AA7075 alaşımının yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi, kütle kaybı gibi yüzey özellikleri ve kesit sertliği, kesit mikroyapısı (optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu) gibi yüzey altı özellikleri incelenerek, bu özelliklerin bilyalı dövme işlem parametrelerine bağlı değişimi ve kök nedenleri ortaya konmuştur.



## 1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN MEKANİK YÜZEY İŞLEMLERİ

Alüminyum ve alaşımları yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek yorulma dayanımı, kolay şekillendirilebilirliği, iyi korozyon dayanımı, yüksek elektrik ve termal iletkenliği gibi özellikleri nedeniyle günümüzün önemli mühendislik metallereinden biri olarak kabul edilmektedir [1-5]. Bugün alüminyum ve alaşımları görece kısa mühendislik tarihlerine rağmen özetlenen bu rekabetçi özellikleri sayesinde çelikten sonra en yaygın kullanılan ikinci mühendislik alaşımlarıdır [6, 7].



Düşük yoğunluklu mühendislik metalleri arasında, saf alüminyum görece yumuşak bir metal olmasına karşın farklı alaşım elementlerinin ilavesi ile yüksek mukavemetli bir mühendislik alaşımı halini alır [7, 8]. Günümüzde yapısal alüminyum alaşımları arasında özellikle 3 grup [Al-Cu (2014, 2024, 2219, 2618), Al-Zn (7075, 7076, 7010, 7050, 7039), Al-Mg-Zn (6061, 6066)] mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir [8]. Özellikle 7xxx ve 2xxx serisi alüminyum alaşımları, yüksek

sıcaklık ve basınç altında çalışabilme özellikleri ve görece iyi mekanik özellikleri sayesinde havacılık ve otomotiv endüstrilerinde ikame edilmesi güç bir yere sahiptir [7]. Örneğin, günümüzün en büyük ticari yolcu uçağı olarak kabul edilen Airbus A380' in %60' ı ve Boeing 747, 757, 767 ve 777 serisi uçaklarında kullanılan yapı malzemelerinin %70'i alüminyum alaşımlarıdır (Şekil 1.1) [8].

### **1.1. AA7xxx Serisi**

Alüminyum alaşımları arasında AA7xxx serisi diğer alüminyum alaşımlarına kıyasla üstün mukavemet-yoğunluk oranı, yüksek kırılma tokluğu ve yüksek yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri nedeniyle havacılık, otomotiv, denizcilik uygulamalarında yapısal mühendislik malzemesi olarak ön plana çıkmaktadırlar [1-5, 8, 10-14]. AA7xxx serisi alüminyum alaşımlarının başlıca alaşım elementleri olan çinko (Zn) ve magnezyumun (Mg) yanı sıra bakır (Cu) ve demir (Fe) gibi alaşım elementleri ilavesiyle en üstün mekanik özelliklere sahip alüminyum alaşımları halini alırlar [7, 8, 15].

Özellikle ticari olarak kullanılan AA7075 alaşımı kompozisyonunda bulunan 5–6% Zn, 2–3% Mg ve 1–2 % Cu alaşım elementleri ve standart olarak uygulanan T6 ısıl işlemleri sonrasında yaklaşık olarak 175 HV sertik, 490 MPa akma ve 570 MPa kopma dayanımı değerlerine ulaşmaktadır [12, 15]. Üstün mekanik özellikleri ve endüstriyel bilinen bir malzeme olması nedeniyle havacılık alanında iniş takımları, kanat parçaları, yatay ve dikey dengeleyici kanatlar, uçak gövdesi ve bazı motor parçalarında kullanılmaktadır [7, 8].

### **1.2. Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerle İlgili Sınırlamalar**

Günümüzde gelişen teknoloji, artan rekabetçi ekonomik koşullar, karbon salınımının azaltılması ve fosil yakıt tüketiminin düşürülmesi gibi çevresel faktörler daha yüksek mukavemet/yoğunluk oranı gibi daha yüksek performanslı ayrıca yüksek yorulma ve korozyon dayanımı gibi daha yüksek servis ömrüne sahip mühendislik malzemelerinin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerde yakıt tasarrufu, imalat maliyetleri gibi nedenlerle daha hafif ve yüksek performanslı malzemelere olan talep alüminyum alaşımlarının geliştirilmesi üzerine gerçekleştirilen çalışmaların yoğunluk kazanmasına neden olmaktadır [8]. Öte yandan

yorulma dayanımı havacılık ve otomotiv endüstrisinde kullanılan malzemelerin performans ve servis ömrünü sınırlayan en büyük problemlerin başında gelmektedir [16, 17]. Bu noktada alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerin geliştirilmesini temel alan uygulamalar dikkat çekici hale gelmiştir [10].

### **1.3. Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesinde Kullanılan Metodlar**

Metal ve alaşımlarının mekanik özelliklerin geliştirilmesi amacıyla uygulanan farklı işlemlerin temelinde yatan amaç, mikroyapı içerisindeki dislokasyon hareketlerinin sınırlandırılmasıdır. Tüm mevcut sertleştirme mekanizmalarında mikroyapı içerisindeki dislokasyonların hareketleri; ince tane sertleşmesi (Hall-Petch), pekleşme (deformasyon sertleşmesi), çökelti sertleşmesi ve katı çözültü sertleşmesi mekanizmaları ile sınırlanır [8, 18]. Alüminyum alaşımları özelinde bu durum yapı içerisindeki alaşım elementleri ve onların intermetalik bileşikleri ile bu sertleştirme mekanizmalarının etkileşimleri ile gerçekleşmektedir. [8].

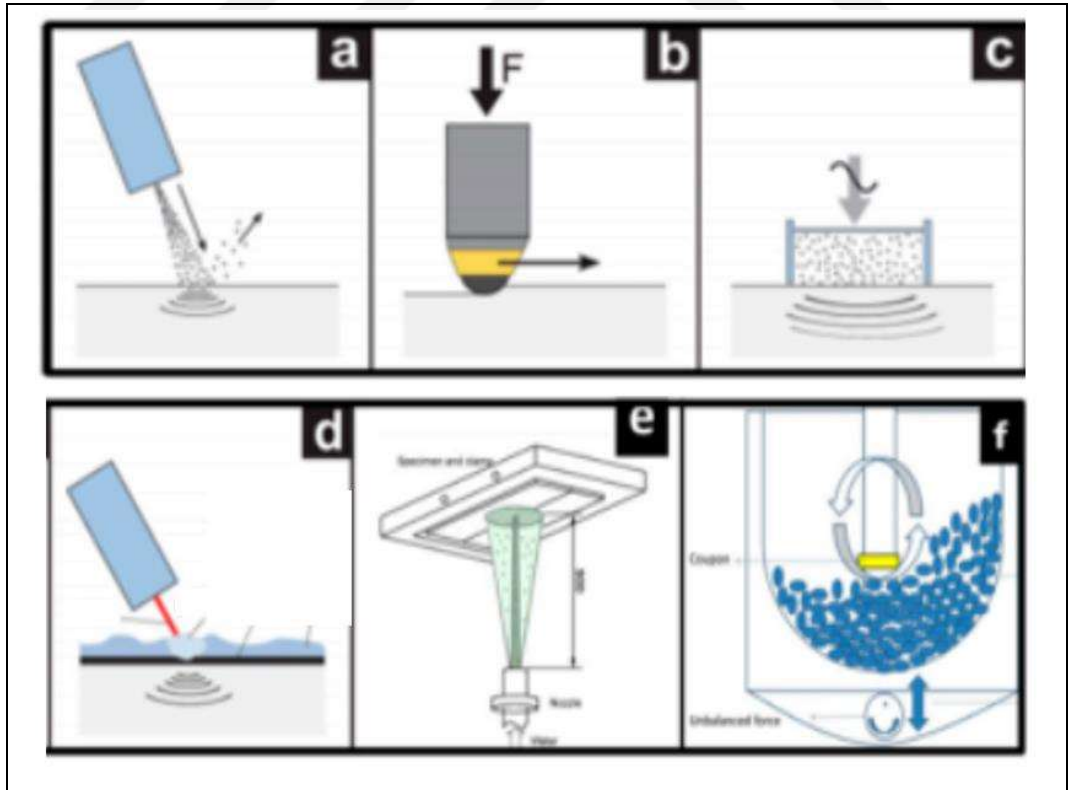
Yorulma dayanımını tekrarlı yükler altında çalışan uygulamalarda (özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisinde) en kritik malzeme özelliklerinin başında gelmektedir. Alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımının geliştirilmesinde malzeme mikroyapısının yeniden modifiye edilmesi (özellikle yüzey altı mikroyapısı) önem kazanmaktadır [16, 17]. Yüzey ve yüzey altı mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin yorulma dayanımına etkisini çatlak oluşumuna ve çatlak ilerlemesine olan etkileri olarak iki aşamalı olarak değerlendirilebilir [17].

Al alaşımlarına genellikle ekstürüzyon, haddeleme, dövme vb. sıcak şekillendirme yöntemleri uygulanmaktadır. Bu alaşımlarda mekanik özellikler mikroyapıya bağlı olarak büyük ölçüde değişim göstermekte ve bu noktada uygulanan termo-mekanik işlemler son derece kritik rol oynamaktadır [1].

Soğuk haddeleme ile alaşımın pekleşmesi alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımı ve setlik artışı üzerinde önemli etkisi olduğu belirtilmiştir. Özellikle yumuşak, düşük mukavemetli alüminyum alaşımlarında (örn AA1100) soğuk haddeleme sonrası yüksek dayanım artışı (% ~100) sağlanır iken, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarında bu oranlar (AA5056) sınırlı kalmıştır (% ~10) [15]. Öte yandan

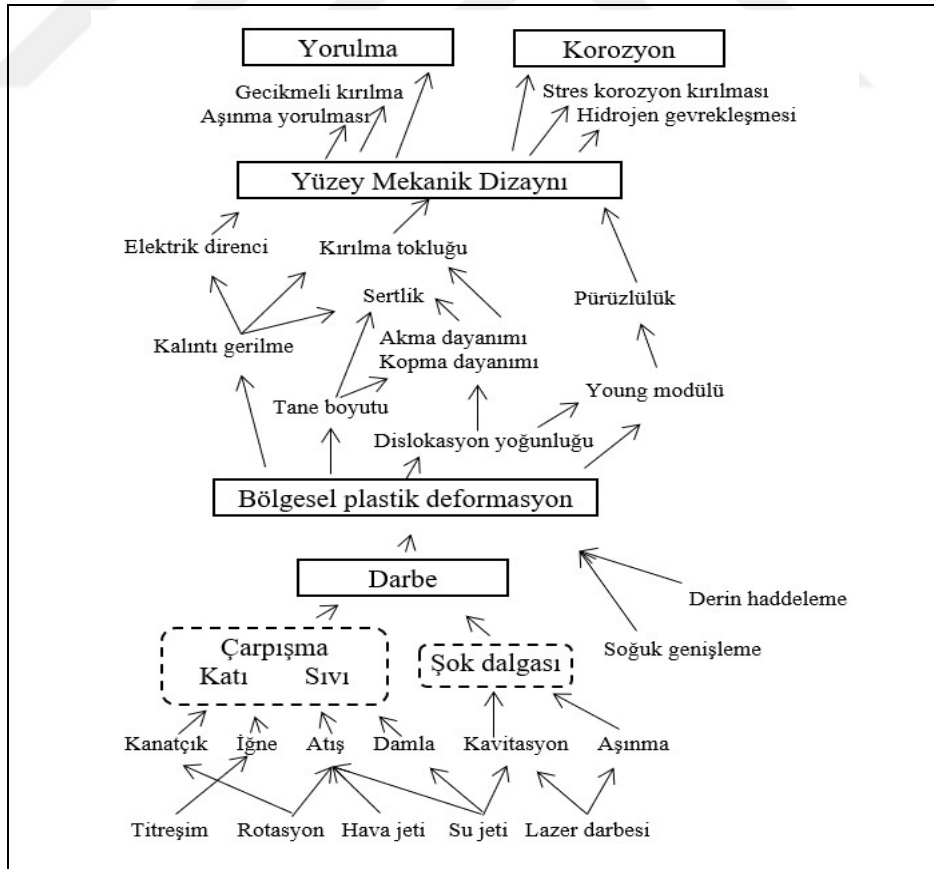
ekstürüzyon ile ince tane sertleşmesi elde edilen AA7050 -T74511 alaşımının yorulma dayanımının %10-15 oranında arttığı belirtilmiştir [15]. Bu noktada deformasyon ve ince tane sertleşmesinin malzeme sertlik artışına ve yorulma dayanımına etkisi açıktır. Bu belirtilen yöntemlerin uygulanabilirliğinin metal ve alaşımlarının geometrisine bağlı olması, yüksek sertlikli alüminyum alaşımlarına uygulanabilirliğinin sınırlı olması gibi nedenler bu yöntemlerin uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır. Öte yandan genel metal ve alaşımlarının sertleştirilmesi için uygulanan bu yöntemler ile aşırı plastik deformasyon elde edilememektedir.

Mühendislik metal ve alaşımlarının yüzey özellikleri, yorulma, korozyon, aşınma, sürünme gibi malzeme performansına ve servis ömrüne etki eden özelliklerin geliştirilmesinde kritik rol oynamaktadır [17, 19]. Bu noktada sadece yüzey ve yüzey altı özelliklerinin kontrolü ve geliştirilmesinin yeterli olduğu görülmektedir. Al alaşımlarının mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla tane boyutunun inceltilmesine yönelik yapılan çalışmalar son yıllarda önemli bir araştırma konusu olmuştur [20].



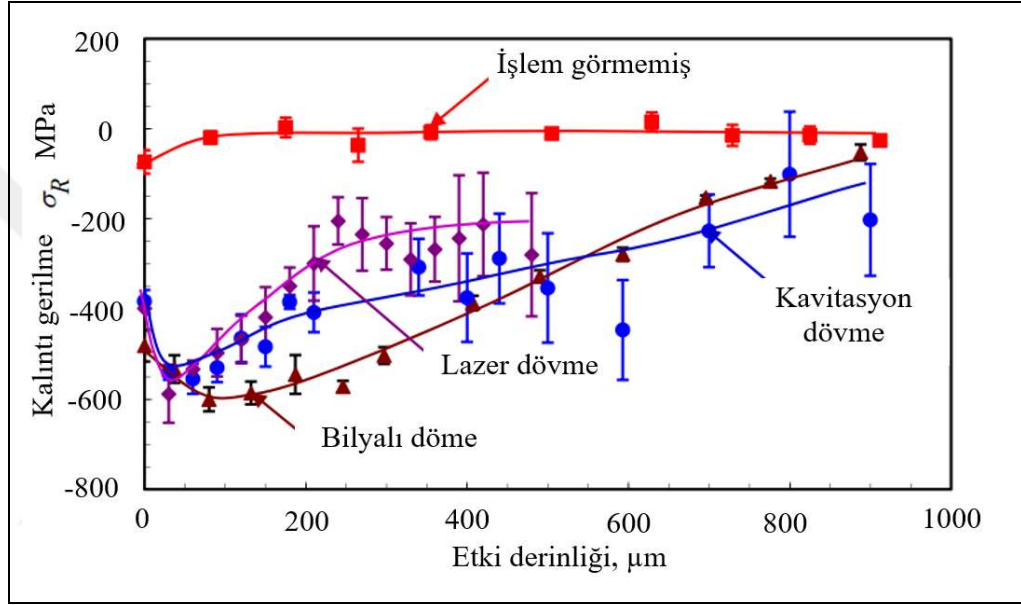
Şekil 1.2. Mekanik yüzey işlemleri, a) bilyalı dövme, b) soğuk derin haddeleme, c) ultrasonik dövme, d) lazer dövme, e) su jeti ile dövme, f) vibrasyon ile dövme [17]

Malzeme yüzey modifikasyon teknikleri, koruyucu kaplamalar, yüzey ısı işlemleri (karbürleme, nitrüleme vb.) ve mekanik yüzey işlemleri olarak değerlendirilebilir. Yüzey kaplama yöntemleri malzeme mikroyapısının ve malzeme mikroyapısına bağlı gelişen malzeme özellikleri üzerinde etkili değildir. Mekanik yüzey işlemleri tam olarak bu özelliklerin geliştirilmesini hedef almaktadır [17]. Mekanik yüzey işlemleri, morfoloji, mikroyapı ve mekanik özellikler gibi malzeme yüzey ve yüzey altı özelliklerinin plastik deformasyona bağlı geliştirilmesini sağlayan yöntemler olarak tanımlanabilirler [17]. Günümüz uygulamaları dikkate alındığında, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan metal ve alaşımlarının mekanik yüzey işlemleri olmadan düşünmenin imkansız olduğu açıktır. Yaygın olarak kullanılan mekanik yüzey işlemleri bilyalı dövme, su jeti ile dövme, kavitasyon dövme, lazer dövme, derin soğuk haddeleme, vibrasyon dövme olarak sayılabilir (Şekil 1.2) [17, 21]. Yüzey işlemleri, işlemin deformasyon yoğunluğuna, kalıntı basma gerilmesi dağılımına, mikroyapıya, mekanik özelliklere ve yorulma dayanımına etkisi şekilde değerlendirilebilir [17, 21].



Şekil 1.3. Mekanik yüzey işlemlerinin genel konsepti ve metal ve alaşımlarının özelliklerine etkilerinin ilişkisinin şematik gösterimi [19]

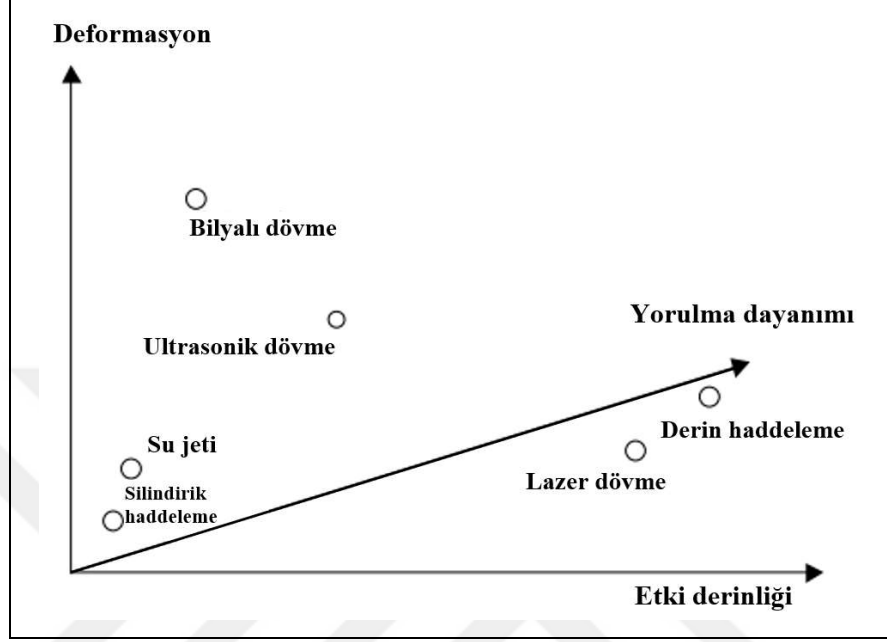
Yüzey ve yüzey altı özelliklerinin geliştirilmesi için kullanılan bu teknikler incelendiğinde genellikle metal ve alaşımlarının mikroyapısının sert medyalar ile aşırı plastik deforme edildiği bazı metolarda ise sıvı ve şok dalgalarının kullanıldığı görülmektedir. Aşırı deformasyon, malzeme kalıntı gerilme, akma dayanımı, pürüzlülük, kırılma tokluğu, Young modülü, sertliği (malzeme akma dayanımı ve kalıntı gerilme miktarı ile alakalı), yorulma dayanımı ve korozyon dayanımı gibi pek çok özelliğini etkilemektedir (Şekil 1.3) [19].



Şekil 1.4. Paslanmaz çelik malzemede yüzey altı kalıntı basma gerilmesi miktarı ve etki derinliğinin farklı mekanik yüzey işlemlere (bilyalı dövme, lazer dövme, kavitasyon dövme) göre değişimi [19]

Mekanik yüzey işlemlerinin yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkisi şeklinde dikkate aldığımızda (kalıntı basma gerilme, sertlik, pürüzlülük, etki derinliği) tüm mekanik yüzey işleme metodlarının metal ve alaşımlarının özellikleri üzerinde farklı etkileri olduğu literatürde belirtilmiştir [19, 21]. Örneğin, Odhiambo ve Soyama [22] yaptıkları çalışmalarda farklı metodlar ile gerçekleştirdikleri yüzey işlemleri sonucunda farklı kalıntı gerilme dağılımları gözlemlemelerine rağmen yorulma dayanımlarının benzer olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 1.4'de bilyalı dövme, lazer dövme, kavitasyon dövme yüzey işlemlerinin yüzey altı kalıntı gerilme derinliğine ve miktarına etkisi gösterilmiştir. Bilyalı dövme ile gerçekleştirilen işlemlerde maksimum kalıntı gerilme miktarı yüzeyin bir miktar altında elde edilirken, lazer dövme ve kavitasyon dövme işlemlerinde maksimum kalıntı gerilme miktarına

yüzeyin hemen altında ulaşılmıştır [19]. Şekil 1.5, farklı mekanik işleme yöntemleri sonrasında elde edilen maksimum pekleşme miktarları ve etki derinliği ilişkisini göstermektedir [21].



Şekil 1.5. Farklı mekanik işleme yöntemleri sonrasında elde edilen maksimum pekleşme miktarları ve etki derinliği ilişkisi [21]

Zaman içerisinde yeni yaklaşımlar ve yeni mekanik yüzey işleme yöntemleri geliştirilmesine rağmen bilyalı dövme işlemi, uygulama kolaylığı, düşük maliyeti ve endüstride bilinen bir yöntem olması nedeniyle mekanik yüzey işleme yöntemleri arasında dikkat çekici bir yöntem olmuştur [23, 24].

## 2. BİLYALI DÖVME

Bilyalı dövme, basınçlı hava ile hızlandırılan yüksek sertlikteki bilyaların (genellikle demir esaslı) metal ve alaşımlarının yüzeyine tekrarlı bir şekilde çarptırılması ile gerçekleşen mekanik bir yüzey işleme yöntemidir (Şekil 2.1). Bilyalı dövme işlemi kolay uygulanabilirliği, düşük maliyeti [25], işlenecek parça için şekil sınırlamasının olmayışı ve benzer amaçla kullanılan diğer yöntemlere göre çevreye karşı zararı olmaması [26, 27] gibi nedenlerle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [27-30].

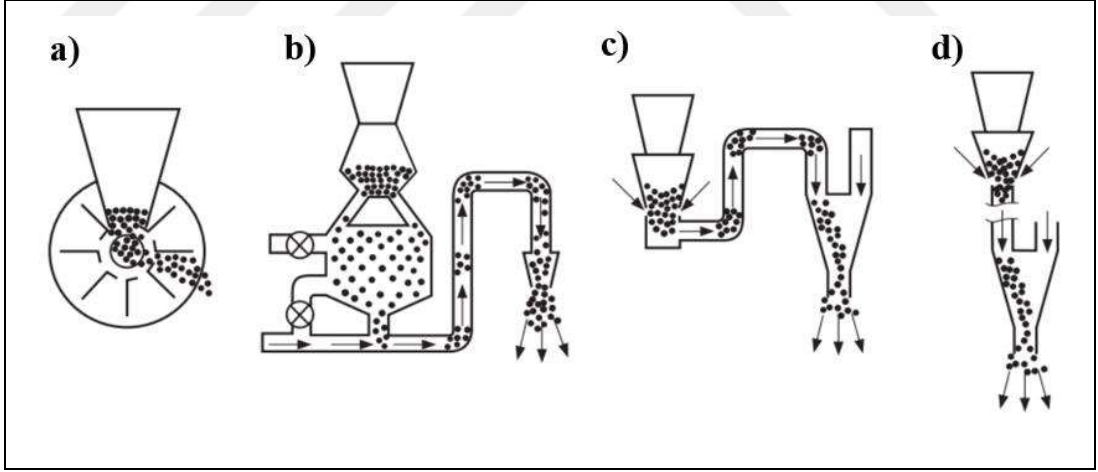


Şekil 2.1. Bir dişli parçasına uygulanan bilyalı dövme uygulaması [31]

Bilyalı dövme işlemleri sırasında medyalar döner disk, basınçlı hava, vakum enjektör nozul, yerçekimli enjektör nozul gibi farklı metodlar yardımıyla hızlandırılabilir (Şekil 2.2) [32]. Döner disk methodunda amaç bilyaların satrifuj yardımıyla hızlandırılmasına dayanmaktadır. Bu yöntem geniş bir malzeme yüzeyinin farklı hız ve çarpma açılarındaki bilyalar ile dövülmesine neden olur. Bilya hızları döner diskin dönüş hızının kontrolü ile ayarlanır. Basınçlı hava sisteminde bilyaların bulunduğu



hazne bir kompresör yardımı ile basınçlandırılır. Basınçlı hava ve medya karışımı bir açıklıktan nozula doğru hareket ettirilerek bilyaların metal ve alaşımlarının yüzeyine püskürtülmesi sağlanır. Bu yöntemde bilyaların hızı, medya/basınçlı hava karışımına bağlı olarak değişim gösterir. Bu yöntemin temel avantajı küçük boyutlu bir nozul kullanımına olanak vermesi nedeniyle dar alanlarda ve kompleks şekilli parçaların dövülmesine olanak sağlaması olarak belirtilebilir. Vakum enjektör nozul ve yerçekimli enjektör nozul sistemlerinde vakumlu hava ve medyalar nozul içerisinde bir araya gelerek, medya/basınçlı hava karışımını oluştururlar. Yüksek basınçlı havanın nozul içerisindeki hareketi sırasında oluşturduğu vakum etkisi medyaların hareket etmesini sağlar. Bu iki yöntemin temel avantajı bilya hızlarının ve miktarlarının diğer iki yönteme kıyasla daha yüksek hassasiyetle kontrolüne olanak sağlamasıdır. Yerçekimli enjektör nozul sisteminin vakum enjektör nozul sisteminden temel farkı ise medyaların bulunduğu hazne nozul yüksekliğinden daha yüksek bir konumda konumlandırılır. Bu sayede bilyaların vakum etkisinin yanısıra yerçekimi kuvvetinin de etkisiyle hareket etmesi sağlanarak daha dengeli medya/basınçlı hava karışı rejimi elde edilir.

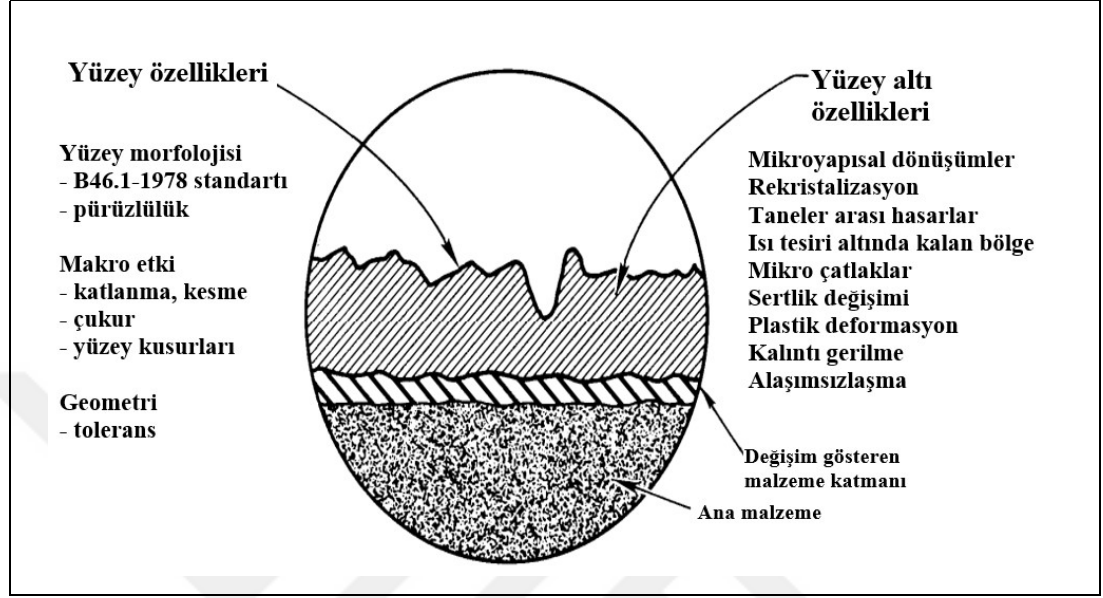


Şekil 2.2. Bilyalı dövme uygulamalarında kullanılan farklı bilyalı dövme cihazı sistemleri, a) döner disk, b) basınçlı hava, c) vakum enjektör nozul, d) yerçekimli enjektör nozul [32]

## 2.1. Bilyalı Dövme İşleminin Metal ve Alaşımlarının Özelliklerine Etkisi

Bilyalı dövme işlemi sonrasında gerçekleşen yüzey ve yüzey altındaki değişimler Şekil 2.3’ de gösterilmiştir. Metal ve alaşımlarının yüzeyine çarpan bilyalar yüzey ve yüzey altında tane incelmesine, yüzey ve yüzey altı bölgesinde kalıntı gerilme ve

sertlik artışına bunun yanı sıra meydana gelen plastik deformasyona bağlı olarak malzemenin yüzey pürüzlülüğünde artışa neden olmaktadır (Şekil 2.4) [17, 23, 27, 30, 33, 34].



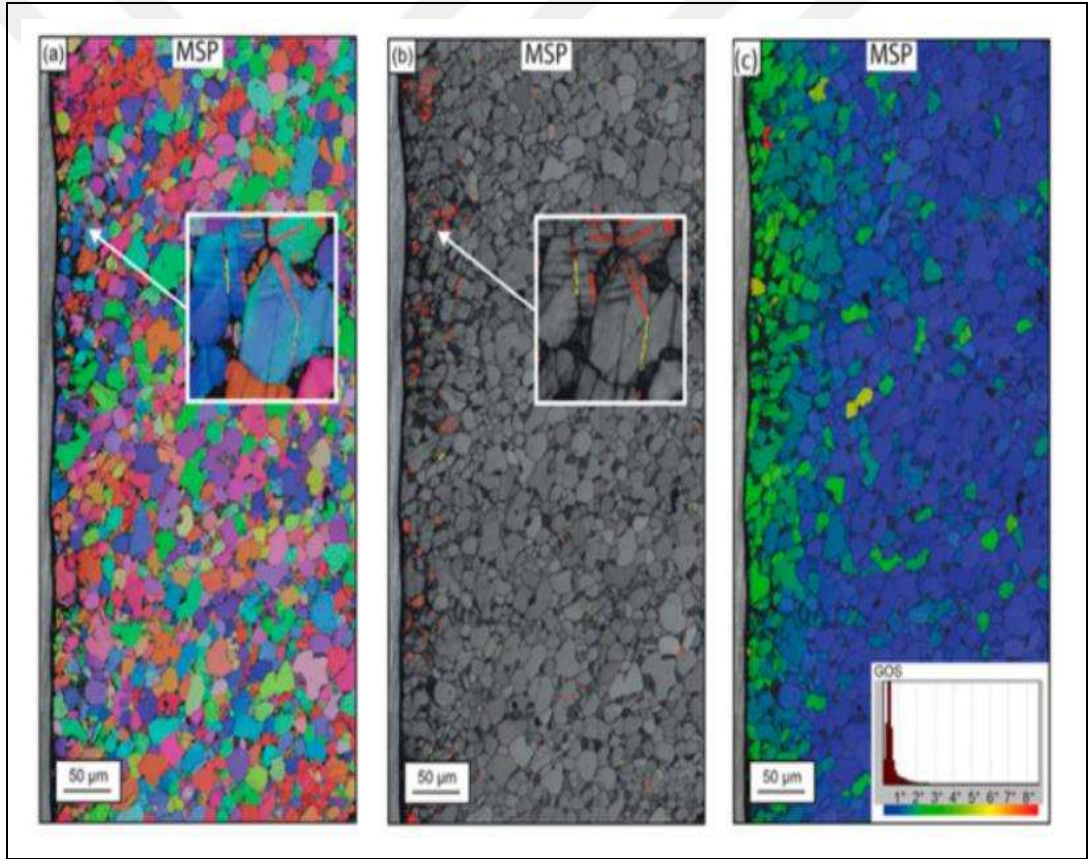
Şekil 2.3. Metal ve alaşımlarının yüzey ve yüzey altı özelliklerinin bilyalı dövme işlemine bağlı değişimi [19]

Mekanik yüzey işlemleri öncesi	Mekanik yüzey işlemleri sonrası	Yorulma dayanımına etki eden mekanizma
<p>Yüzey</p> <p>Yüzey altı sertlik değişimi</p>	<p>deformasyon derinliği</p> <p>Yüzey altı sertlik değişimi</p>	Deformasyona bağlı pekleşme etkisi
<p>Yüzey</p> <p>Kalıntı gerilme yok</p>	<p>kalıntı gerilme derinliği</p> <p>Kalıntı basma gerilme</p>	Kalıntı gerilmeye bağlı ön stress etkisi
<p>Yüzey</p>	<p>çentik derinliği</p>	Yüzey pürüzlülüğüne bağlı çentik oluşum etkisi

Şekil 2.4. Bilyalı dövme işlemi sonrası metal ve alaşımlarının yüzey ve yüzey altı özelliklerinin değişimi [32]

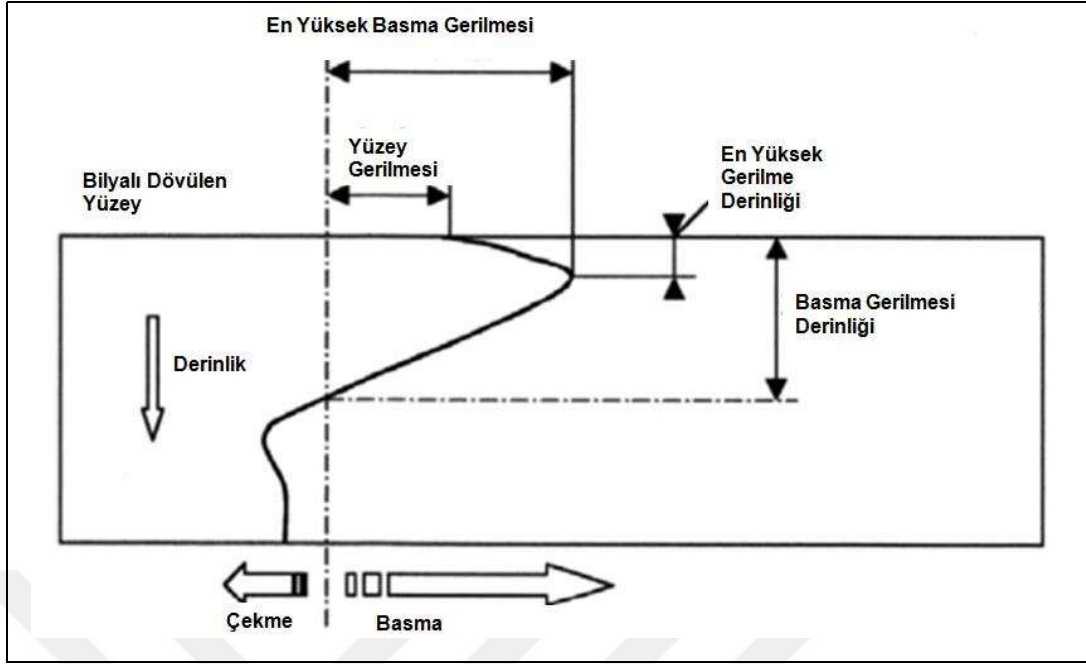
Metal ve alaşımlarının yüzey ve yüzey altı mikro yapısı bilyalı dövme işlemi sırasında meydana gelen aşırı deformasyonlar ile gerçekleşen pek çok metalurjik mekanizmasının sonucunda tamamen modifiye edilerek, metal ve alaşımlarının

özelliklerinin gelişmesini sağlar. Gerçekleşen bu mekanizmaların miktarı ve türü, bilyalı dövme işlem parametrelerine ve metal ve alaşımlarının özelliklerine bağlı olmakla birlikte, tanelerin tekrar oryante olması, kayma bantları, nanotane oluşumları, ikizlenme, martenzitik dönüşümler, çöktellerin kırılarak mikro yapıya dağılması olarak sayılabilir [21]. Bilyalı dövme işlemi sırasında gözlemlenen plastik deformasyon [34] ve dislokasyon artışı nedeniyle yüzey ve yüzey altı bölgesinde tane incelmeleri gerçekleşir [27]. Tane incelmelerinin görüldüğü bölgede sertlik ve tokluk gibi mekanik özellikler iyileşir. Şekil 2.5’de Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövülmesi sonrası değişen yüzey mikroyapısı ve tane boyutu ile ilgili bir EBSD çalışmasının sonucu görülmektedir [17].



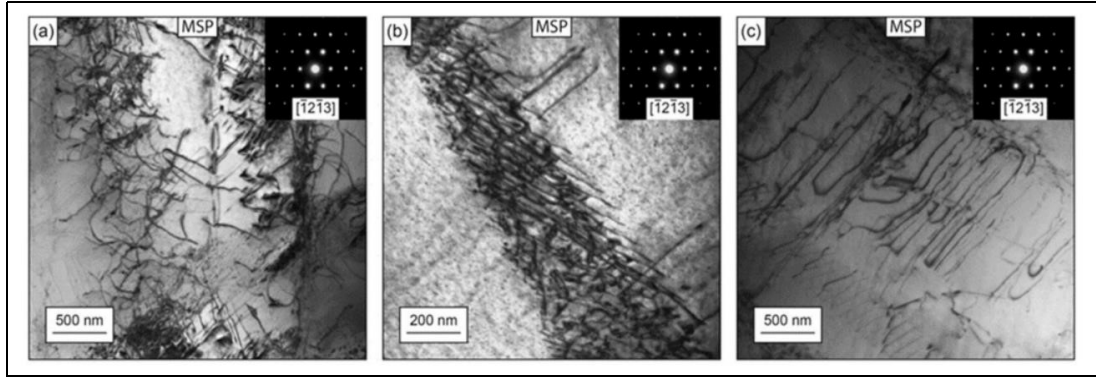
Şekil 2.5. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövülmesi sonrası değişen yüzey mikroyapısı ve tane boyutu ile ilgili bir EBSD çalışması [17]

Bilyaların yüksek hızlarla malzeme yüzeyine çarptırılması metal ve alaşımlarının yüzeyinde plastik deformasyona neden olmaktadır [33, 35]. Yüzeyde meydana gelen plastik deformasyona bağlı olarak kalıntı basma gerilmeleri oluşmaktadır (Şekil 2.6) [25-29, 36, 37].



Şekil 2.6. Bilyalı dövme ile metal ve alaşımlarının yüzey altı kalıntı basma gerilmesi gelişimi [38]

Metal ve alaşımlarının sertlik artışı, bilyalı dövme sırasında meydana gelen pekleşmenin/deformasyon sertleşmesinin bir sonucudur [21, 28, 34]. Pekleşme, malzeme deformasyonunun doyum noktasına ulaşması yani malzemenin bir noktadan sonra daha fazla dislokasyon miktarını arttıramaması sonucu malzemenin deformasyona karşı direnç göstermesi olarak tanımlanabilir [33, 34]. Şekil 2.7’de bilyalı dövme sonrası AISI 304 çeliğinde deformasyona bağlı artan dislokasyon yoğunluğu görülmektedir [17]. Metal ve alaşımlarının yapısında deformasyona karşı oluşan bu direnç, malzeme akma dayanımının ve sertliğinin atmasına neden olur [17, 30, 39-41]. Dövme sonrası pekleşme miktarı, tane boyut dağılımına, taneler arası ara yüzey ilişkisine, dislokasyon yoğunluğuna, ve malzeme kayma bandlarına bağlı olarak değişim gösterir [17]. Buna ek olarak, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarında deformasyona bağlı olarak çökeltilerin kırımlararak deforme olan bölgede dağılmasından dolayı çökelti sertleşmesine bağlı sertlik artışı da sağlanır [42]. Öte yandan literatürde, aşırı deformasyon sonucu malzeme sertlik değerinde artışın ardından tekrar azalma görülebileceği, ayrıca bilyalı dövme sonrası yüzey altı bölgesinde gözlemlenen kalıntı basma gerilmesinin özellikle basit sertlik ölçümlerinde hatalı sonuçlar elde edilmesine neden olabileceği belirtilmiştir [21].



Şekil 2.7. Bilyalı dövme sonrası AISI 304 çeliğinde deformasyona bağlı artan dislokasyon yoğunluğunun geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü [17]

## 2.2. Bilyalı Dövmenin Metal ve Alaşımlarının Performansına Etkisi

Bilyalı dövme işleminin temel amacı metal ve alaşımlarının yüzeyine yüksek hızla çarptırılan bilyalar aracılığıyla malzeme yüzey ve yüzey altı bölgesinde basma kalıntı gerilmeleri oluşturarak yorulma ömrünü geliştirmektir ancak bilyalı dövme ile değişen yüzey ve yüzey altı sertliği ve yüzey pürüzlülüğününün de yorulma dayanımı üzerinde önemli etkileri olduğu bilinmektedir (Tablo 2.1) [25-27, 29, 33, 39, 43]. Bunun yanında bilyalı dövme işlemi aşınma dayanımı [27, 44, 45], korozyon dayanımı [46-49], kaynak bölgesi özelliklerinin geliştirilmesi [50-53] için önemli olduğu literatürde bildirilmiştir. Bu nedenle, mekanik yüzey işlemleri ile geliştirilen yorulma dayanımı için önemli malzeme özellikleri kalıntı basma gerilmesi, sertlik ve pürüzlülük olarak 3 grup altında incelenebilir [21].

Tablo 2.1. Bilyalı dövme ile değişen metal ve alaşımlarının özelliklerinin yorulma dayanımına etkisi [21, 54]

	Çatlak başlangıcı	Çatlak ilerlemesi
Yüzey pürüzlülüğü	Hızlandırıcı etki	Etki yok
Sertlik	Geciktirici etki	Hızlandırıcı etki
Kalıntı basma gerilme	Az etkili veya etki yok	Geciktirici etki

Sertlik artışı ve kalıntı basma gerilmesi metal ve alaşımlarının yorulma ömrünün geliştirilmesinde rol oynayan iki mekanizmadır [39, 40, 42]. Kalıntı basma gerilmesi, yorulma yükü altında çalışan parçalarda oluşan çatlaklar üzerinde baskı kuvveti oluşturarak yüzey merkezinde görülen kritik çatlakların malzeme içerisine doğru ilerlemesinin yavaşlatılmasını sağlar [21, 39]. Bilyalı dövme işlemi ile metal ve alaşımlarının yüzey ve yüzey altı bölgesinde elde edilebilecek maksimum kalıntı

basma gerilmesi miktarı bilyalı dövme işlem parameterleri ve malzeme özellikleri (özellikle malzemenin akma mukavemeti) ile doğrudan ilişkili ve sınırlıdır [21]. Bu nedenle bilyalı dövme işlem parameterlerinin diğer yüzey ve yüzey altı özelliklerine de etkisi düşünülerek doğru olarak seçilmesi bilyalı dövme işlemiyle metal ve alaşımlarının özelliklerinin optimum derecede geliştirilebilmesi için önemlidir [21].

Sertlik artışının yorulma dayanımının artırılması açısından önemi, sertlik artışının çatlak başlangıcı süresini geliştirerek yorulma ömrünü arttırması olarak açıklanabilir [39]. Bilyalı dövme işlemi sonrası görülen sertlik atışı malzemenin plastik deformasyona karşı olan direncini arttırmakta, bu durum metal ve alaşımlarının yüzeyinde kritik çatlak oluşum hızının yavaşlamasına neden olmaktadır [21, 39]. Deformasyon sonucu malzemenin gevrekleşebileceği bu durumun ise örneğin alüminyum alaşımlarında malzeme sünekliğini azaltacağı için çatlak oluşum büyüme hızını arttırabileceği belirtilmiştir [10, 17, 39, 41].

Literatürde yumuşak metaller ve sert metallerde yorulma davranışına etki eden temel mekanizmanın farklı olduğunu bildirilmiştir. Sert metallerde, çatlak ilerlemesinin etkin yorulma mekanizması olduğu bu nedenle kalıntı basma gerilmenin sert metallere için daha önemli olduğu vurgulanırken, yumuşak metallerde çatlak başlangıcının malzeme dayanımına etki eden dominant mekanizma olmasından dolayı yüzey sertliğinin daha çok ön plana çıktığı belirtilmiştir [21].

Alüminyum alaşımının bilyalı dövme ile mekanik özelliklerinin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar kalıntı gerilme ve sertlik gelişiminin birbirine bağlı olarak gelişim gösterdiğini ortaya koymuştur [55]. Zupanc ve ark. [42] AA7075-T6 alaşımının bilyalı dövme sonrası yorulma dayanımı üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, yorulma yüküne bağlı oluşan kritik çatlak oluşumun, kalıntı gerilme yüküne bağlı olarak deformasyon sertleşmesi görülen bölgenin altında gözlemlendiğini belirtmiştir. Guechichi ve Castex [56] deformasyon sertleşmesinin kalıntı basma gerilmesine kıyasla yorulma dayanımı üzerinde daha etkili olduğunu çünkü kalıntı basma miktarının yaklaşık yarısının yorulma yükünün erken aşamalarında kaybedildiğini belirtmişlerdir ancak deformasyon sertleşmesinin kalıntı basma gerilmesine göre daha stabil bir davranış gösterdiğini öne sürmüşlerdir. Öte yandan literatürde, sertliğin akma dayanımı ile doğrudan alakalı olduğu bu nedenle yorulma dayanımının sertliğin bir fonksiyonu

olarak dikkate alınabileceği belirtilmiştir. Diğer bir değişle sertliğin yorulma dayanımına etki eden en önemli parametrelerden biri olduğu söylenebilir [19].

Bilyalı dövme işleminin en önemli parametrelerinden biri de etki derinliğidir. Etki derinliği bilyalı dövme sonrası malzeme yakın yüzey altı bölgesinde bilyalı dövmeye bağlı değişen kalıntı basma gerilmesi ve sertlik değişimi derinliğini ifade eder. Etki derinliği bilyalı parametrelere, basınç, doyurma oranı, almen şiddeti vb. pek çok parametrenin bir sonucu olarak gözlemlenir [21].

Bilyalı dövme işlemi sonucu metal ve alaşımlarının yüzeyinde meydana gelen yüzey deformasyonu, yüzey pürüzlülüğünün artmasına ve yüzeyde kritik çatlak başlangıç noktalarının oluşmasına neden olmaktadır [27, 30, 33]. Artan yüzey pürüzlülüğü ve yüzey kusurları yorulma dayanımının düşmesine neden olur [21, 33, 39] (Şekil 2.3). Literatürde bilyalı dövme sonrası artan yüzey pürüzlülüğünün yeni çatlak oluşumlarına neden olmasıyla ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır [26, 39, 43]. Yine bilyalı dövme sonrası artan yüzey pürüzlülüğünün korozyon dayanımının düşürdüğü belirtilmiştir [34].

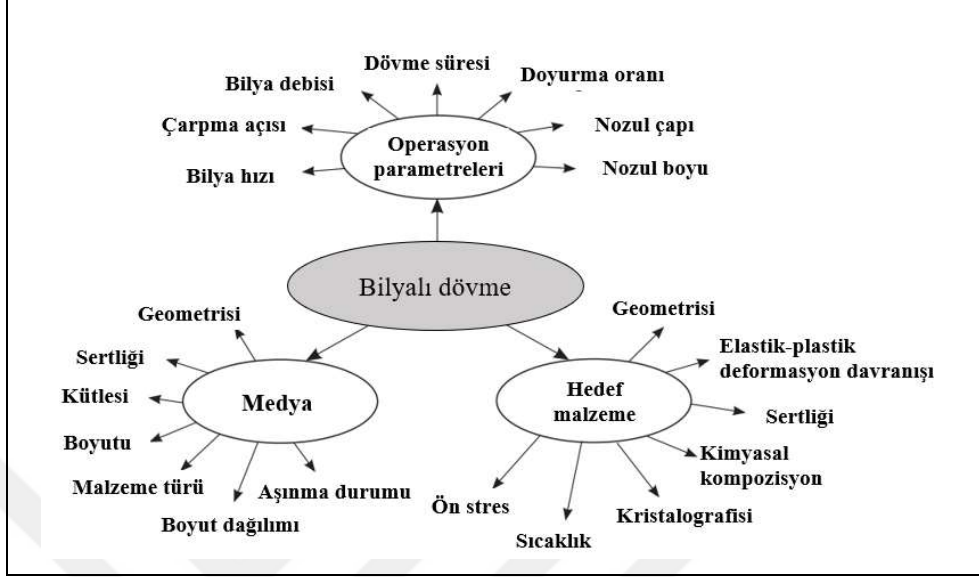
### **2.3. Bilyalı Dövme İşlem Parametreleri**

Bilyalı dövme işlemi sırasında medyalar ile hedef malzeme arasında gerçekleşen elastik ve plastik çarpışmalar, bilyaların sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmının hedef malzeme üzerine aktarılması sağlar [32]. Bilyalı dövme işlemi sonrası değişen yüzey ve yüzey altı özellikleri bu tekrarlı çarpma işlemlerinin bir sonucudur ve bilyalı dövme parametrelere (hedef malzeme özellikleri, bilya özellikleri, operasyon parametreleri, çevre koşulları) bağlı olarak kontrol edilebilmektedir [33, 34]. Bu nedenle bilyalı dövme işlemine etki eden parametrelerin anlaşılması bilyalı dövme işleminin istenen hedefler doğrultusunda en uygun şekilde uygulanabilmesi ve oluşabilecek olumsuz etkilerinin kontrol edilebilmesi açısından önem arz etmektedir.

Bilyalı dövme işlemlerinde, döküm çelik, kesme tel gibi metal bilyalar (dökme demir, paslanmaz çelik, nikel vb.), seramik ve cam küre gibi metalik olmayan bilyalar (alümina seramik, zirkonyum seramik, silikat cam) organik medyalar (çeşitli polimerik medyalar) ve bazı doğal materyaller medya olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.9).

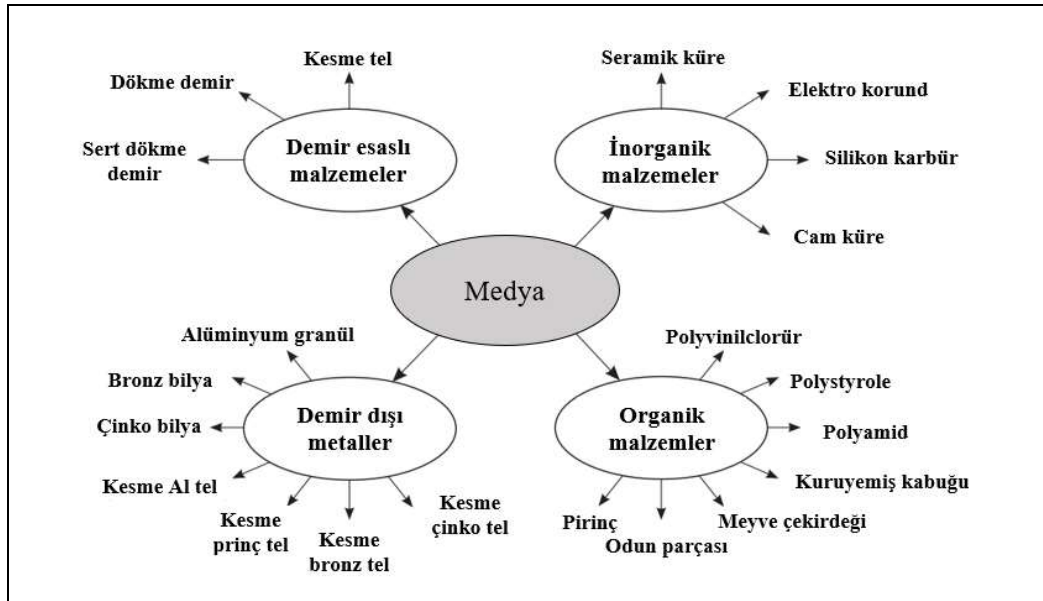


Medyalar kimyasal kompozisyon, boyut, boyut aralığı dağılımı, küresellik, tokluk, sertlik ve yoğunluk gibi özelliklerine göre karakterize edilebilirler [32].



Şekil 2.8. Bilyalı dövme işlemine etki eden parametrelerin genel görünümü [32, 38].

Medya özellikleri bilyalı dövülen metal ve alaşımlarının özelliklerinin geliştirilmesinde önemli bir role sahiptir [57]. Örneğin, yüksek kalıntı gerilmesi ve sertlik artışı için medya sertliğinin en az hedef malzeme sertliğinde olması gerektiği belirtilmiştir [58]. Bir başka çalışmada, medya boyutunun etki derinliği için önemli olduğu belirtilmiştir [59].



Şekil 2.9. Bilya dövme işlemlerinde kullanılan medya türleri [32]



Bilya boyutunun ulaşılması g karmaşık şekilli parçaların dlmesinde önemli olduğu, kk bilyaların bu tarz çalışmalarda tercih edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Öte yandan kullanılacak medya türünün belirlenmesinde, hedef malzeme mekanik özellikleri önemlidir. Örneğin yüksek sertlikli çeliklerin dlmesinde yüksek sertlikli elik ve seramik medyalar malzeme özelliklerinin geliştirilmesinde daha faydalı olurken, alüminyum ve alaşımları gibi görece daha yumuşak metal ve alaşımlarının bilyalı dlmesinde veya düşük yoğunluklu dme işlemlerinin gerçekleştirilmesinde daha düşük sertlikli cam bilya türü medyaların kullanılması yeterli olabilmektedir [32]. Ayrıca yüzey kontaminasyonunun önemli olduğu uygulama alanlarında seramik ve cam medyaların kullanımı paslanmaz elik bilya türlerine göre daha ön plana çıkmaktadır [32]. Medya türüne bağlı olarak değişim gösteren bir diğer paramtere de medya yoğunluğudur. Medya yoğunluğunun değişimi bilyalı dme işleminin şiddeti üzerinde önemli bir yere sahiptir [32].

### **3. AA7075 ALAŞIMLARININ BİLYALI DÖVÜLMESİ ÜZERİNE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR**

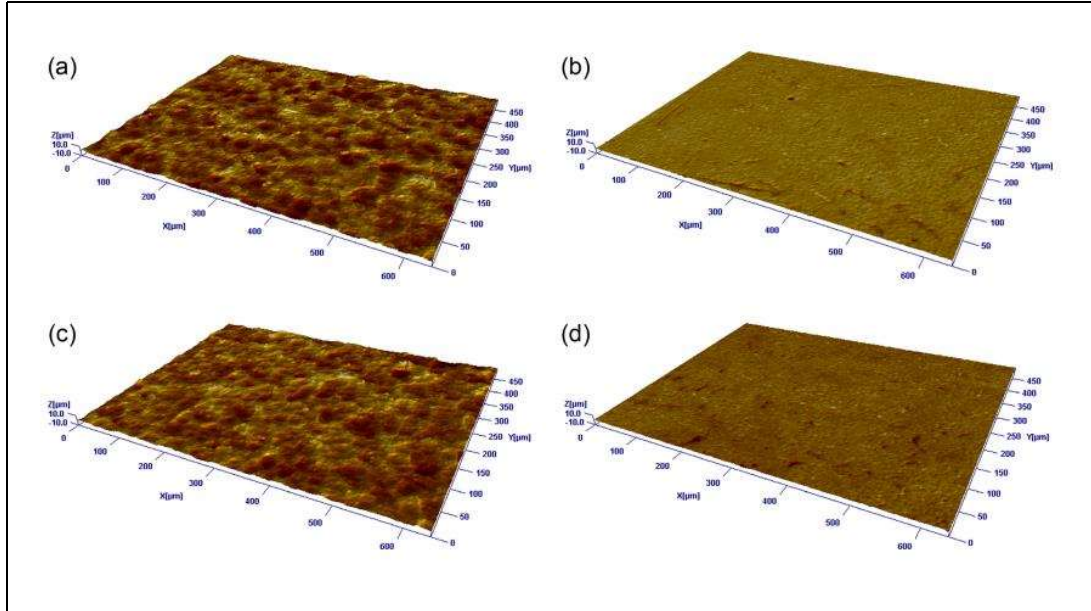
Literatürde AA7xxx serisi alaşımların bilyalı dövülmesi üzerine Scopus® bilimsel makale veri tabanına göre son 20 yılda 60'in üzerinde yayın yapılmıştır. Bu çalışmaların büyük çoğu kalıntı gerilme ve yorulma üzerine gerçekleştirilmiş, bilyalı dövmenin yüzey altı sertlik değişimine etkisi, sertlik değişiminin yorulma dayanımına etkisi, bilyalı dövme sonrası yüzey özellikleri değişimi, yüzey özelliklerinin yorulma dayanımına etkisi gibi konular da tartışılmıştır. Bununla birlikte sınırlı sayıda çalışmada bilyalı dövme işleminin korozyon özelliklerine etkisi [46, 60-65], bilyalı dövme işleminin aşınmaya etkisi [66], bilyalı dövme işleminin aşınmalı yorulmaya etkisi [67-69], bilyalı dövme işleminin kaynak bölgesine etkisi [70] konular da incelenmiştir. Çalışmaların çoğu geleneksel bilyalı dövme yöntemleri ile gerçekleştirilmiş olmasına karşın, lazer dövme [68, 70-75], ultrasonik bilyalı dövme [46, 60, 65, 74, 76], derin haddeleme [67] gibi yeni bilyalı dövme yöntemleri üzerine gerçekleştirilen çalışmalar da son yıllarda ağırlık kazanmaya başlamıştır. AA7xxx serisi alaşımların dövülmesinde, zirkonya seramik [10, 43, 57, 71, 77-79] silika seramik [39], alümina seramik [61], silika cam [10, 39, 41, 68, 71, 80] gibi medyalarla dövme işlemleri gerçekleştirilmiş olmasına karşın, ağırlıklı olarak paslanmaz çelik bilyalar döküm çelik [43, 57, 68, 71, 78, 79] ve tel kesme çelik bilyalar [78] kullanılmıştır.

#### **3.1. Bilyalı Dövme İşleminin Yüzey Sertliğine ve Topografyaya Etkisi**

Chadwick ve ark. [81] ve Sharp ve ark. [80] AA7xxx serisi gibi görece yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının bile yumuşak yapıları gereği bilyalı dövme sonrası yüzeylerinde yüksek hasar oluşumunun ayrıca bu nedenle alüminyum alaşımlarının bilyalı dövülmesinde tercih edilecek dövme parametrelerinin ve medya türünün doğru seçilmesinin önemli olduğu belirtilmiştir. Ferreira ve ark. [41] ve Carvalho ve ark. [10] cam kürelerin seramik bilyalara göre daha az yüzey hasarına neden olduğunu Sharp ve ark. [80] alüminyum alaşımlarının bilyalı dövülmesinde çelik bilya kullanımının yüksek yüzey hasarına neden olduğunu bunu yerine seramik ve cam

gibi daha hafif bilyaların kullanımının daha faydalı olacağını bildirmişlerdir. Öte yandan Segurado ve ark. [82] seramik ve cam kürelerin çelik bilyalara göre daha kusursuz yüzey morfolojisine sahip olmasının bilyalı dövülen yüzey özellikleri açısından önemli olduğunu belirtmiştir. Bianchetti ve ark. [78] medya seçiminin yüzey temizliğinin önemli olduğu parçalarda kritik olduğunu çelik kesme tel, döküm bilya ve seramik bilya yüzey kirliliğine yol açabileceğini bildirmiştir. Kazuyuki Oguri [61], Marini ve ark. [83] ve Benedetti ve ark. [39] AA7xxx alaşımlarının bilyalı dövülmesinde ince taneli medyaların tercihinin daha düşük yüzey pürüzlülüğüne neden olduğunu ve yüzey bütünlüğü açısından daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Tam aksine Bianchetti ve ark. [78] küçük boyutlu bilyaların keskin köşeli ve dar çukurlar yarattığı bunun da çatlak oluşumu başlangıçları için ideal bölgeler oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Yapılan çalışmalar özetlendiğinde yüzey kalitesi için bilya türü, boyutu ve dövme şiddeti seçiminin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey hasar oluşumu için önemli olduğu görülmektedir. Ullah ve ark. [58], Carvalho ve ark. [10] ve Benedetti ve ark. [39] (Şekil 3.1) yüzey pürüzlülüğü ve deformasyon miktarının bilya boyutuna ve türüne bağlı olarak değişen bilya kinetik enerjisinin üzerinde belirleyici olduğunu belirtmiştir.

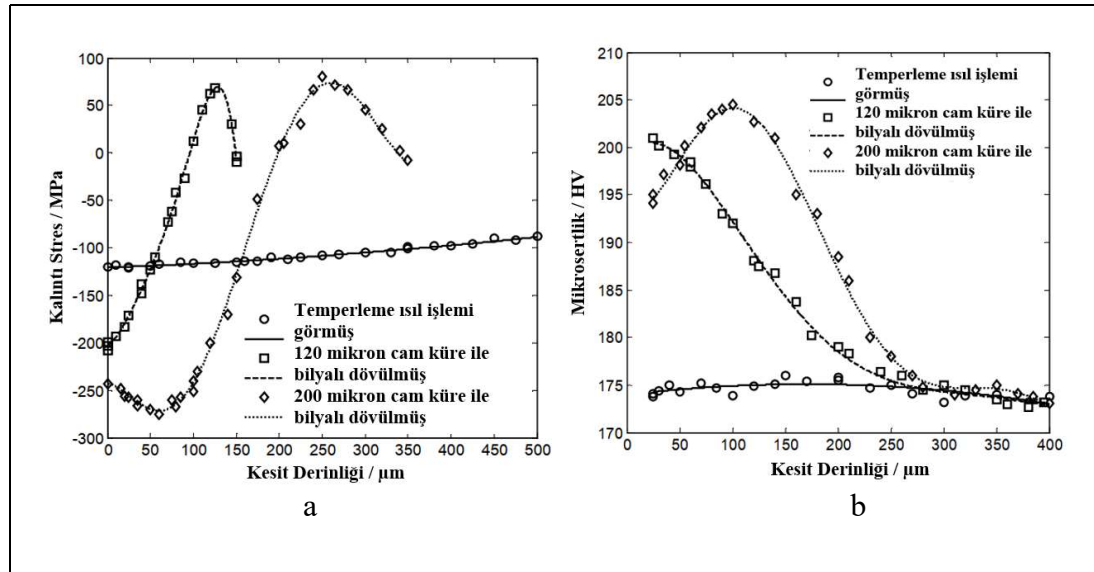


Şekil 3.1. Farklı yüzey işlemleri ve bilyalı dövme parametrelerinin AA7075-T6 alaşımının yüzey topografyasına etkileri, a) B120 zirkonya bilya ile bilyalı dövme, b) B120 zirkonya bilya ile bilyalı dövme ve tribofinish yüzey işlemi, c) V40 cam küre ile bilyalı dövme, d) V40 cam küre ile bilyalı dövme ve tribofinish yüzey işlemi [39]

Bilyalı dövme sonrası metal ve alaşımlarının yüzeyinde gözlenen yüzey pürüzlülüğü artışı ve yüzey kusurlarının yorulma dayanımı ve diğer malzeme performansını etkileyen mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etki yarattığı literatürde pek çok çalışmada bildirilmiştir [10, 39, 80, 83]. Kazuyuki Oguri [61] AA7xxx alaşımlarında bilyalı dövme sonrası yüzeyde meydana gelen yüzey kusurlarının yorulma yükleri altında kritik çatlak başlangıcı gibi davrandığını bu nedenle yorulma dayanımının olumsuz etkilediği, yüzeyinin çatlak başlangıcına neden olacak kusurlar içermemesi durumunda çatlak başlangıç noktalarının yüzey altında bölgesinde yer aldığı bu nedenle yorulma dayanımının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Öte yandan Chadwick ve ark. [81] AA7xxx serisi alaşımlarda yüzey altı kritik çatlak bölgelerinin genellikle bilyalı dövme ile kırılan  $Al_7Cu_2Fe$  çökeltileri olduğunu bildirmişlerdir.

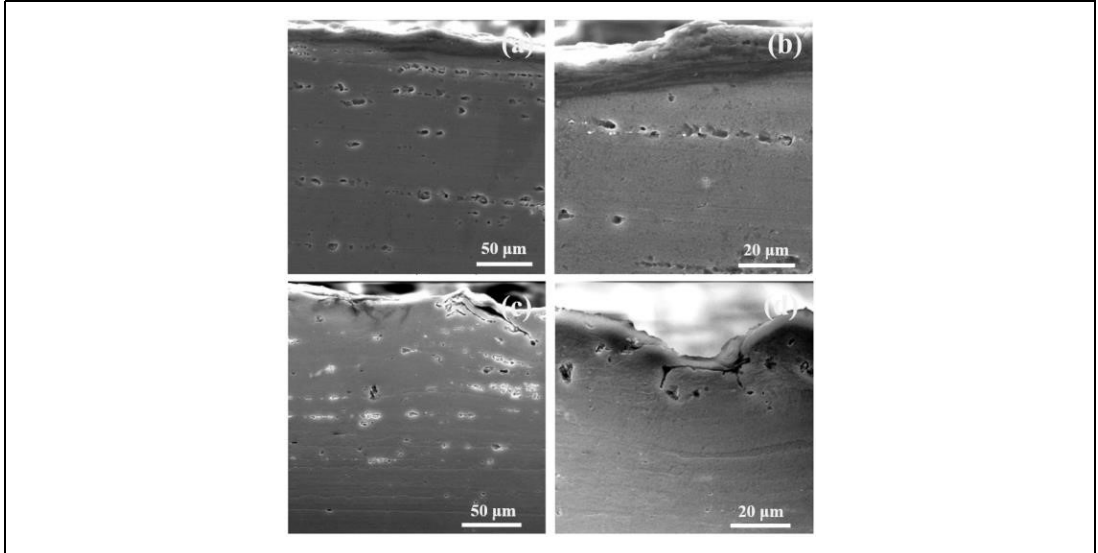
### 3.2. Bilyalı Dövme İşleminin Kesit Sertliğine Etkisi

AA7xxx serisi alaşımların bilyalı dövme sonrası deformasyona bağlı değişen yüzey ve yüzey altı sertliğinin detaylı incelendiği çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Mevcut literatür çalışmalarında, sertik değişimi malzemenin yorulma ve tribolojik özellikleri üzerinde önemli bir parametre olarak belirtilmesine rağmen bilyalı dövme işlem parametrelerinin kalıntı basma gerilmesi üzerine etkisi incelemelerinin gerisinde kalmış sertlik değişimi derinlemesine incelenmemiştir.



Şekil 3.2. Farklı bilyalı dövme işlemleri sonrası yüzey altı kalıntı gerilme ve sertlik değişimleri a) kesit kalıntı gerilme, b) kesit sertlik [55]

Libor Trsko ve ark. [43] ve Md. Harding ve ark. [84] AA7xxx serisi alaşımların bilyalı dövme sonrası sertlik değişimi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarda, yüzey altı mikroyapısının deformasyona bağlı değiştiği bunun sonucunda pekleşmeye bağlı sertlik artışı gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Harding ve ark. [84] ayrıca yüzey altında görülen kalıntı basma gerilmelerinin sertlik artışı üzerinde rol oynadığını belirtmiştir. Hu ve ark. [55] (Şekil 3.2), AA7xxx serisi alaşımlarda yüzey altı sertliği ve kalıntı basma gerilme değerlerinin benzer trend gösterdiğini bildirmişlerdir. Trsko ve ark. [43, 57] gerçekleştirdikleri başka bir çalışmada medya türü, boyutu, bilyalı dövme şiddeti ve doyurma oranının bilyalı dövme sonrası kesit sertliğine etki eden en kritik üç parametre olduğunu belirtmiştir (Şekil 3.3). Öte yandan, bu parametrelerin tek tek optimizasyonunun sağlanamayacağı, bilyalı dövme parametrelerinin etkisinin mekanik özelliklerin geliştirilmesi noktasında birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Bu noktada kritik noktanın aşırı dövme yapılan metal ve alaşımlarında aşırı sertlik artışının gevrekleşmeye neden olduğunu bu durumun yorulma dayanımı ve diğer malzeme mekanik özelliklerini olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca bilyalı dövme değişen yüzey sertliğinin yorulma yükü altında oluşan yüzey çatlaklarının çatlak oluşum şekilleri ve çatlak ilerleme doğrultuları üzerinde etkili olduğunu bildirmiştir.



Şekil 3.3. AA7xxx alaşımların farklı bilyalı dövme parametrelerine bağlı (medya türü, boyutu, bilyalı dövme şiddeti ve doyurma oranı) kesit mikro yapısının değişimini gösteren SEM görüntüsü, a) 8.3N/100% dövülen malzeme kesit mikro yapısı 1kx büyütme, b) 8.3N/100% dövülen malzeme kesit mikro yapısı 2kx büyütme, c) 14.4A/100% dövülen malzeme kesit mikro yapısı 1kx büyütme, d) 14.4A/100% dövülen malzeme kesit mikro yapısı 1kx büyütme [57]

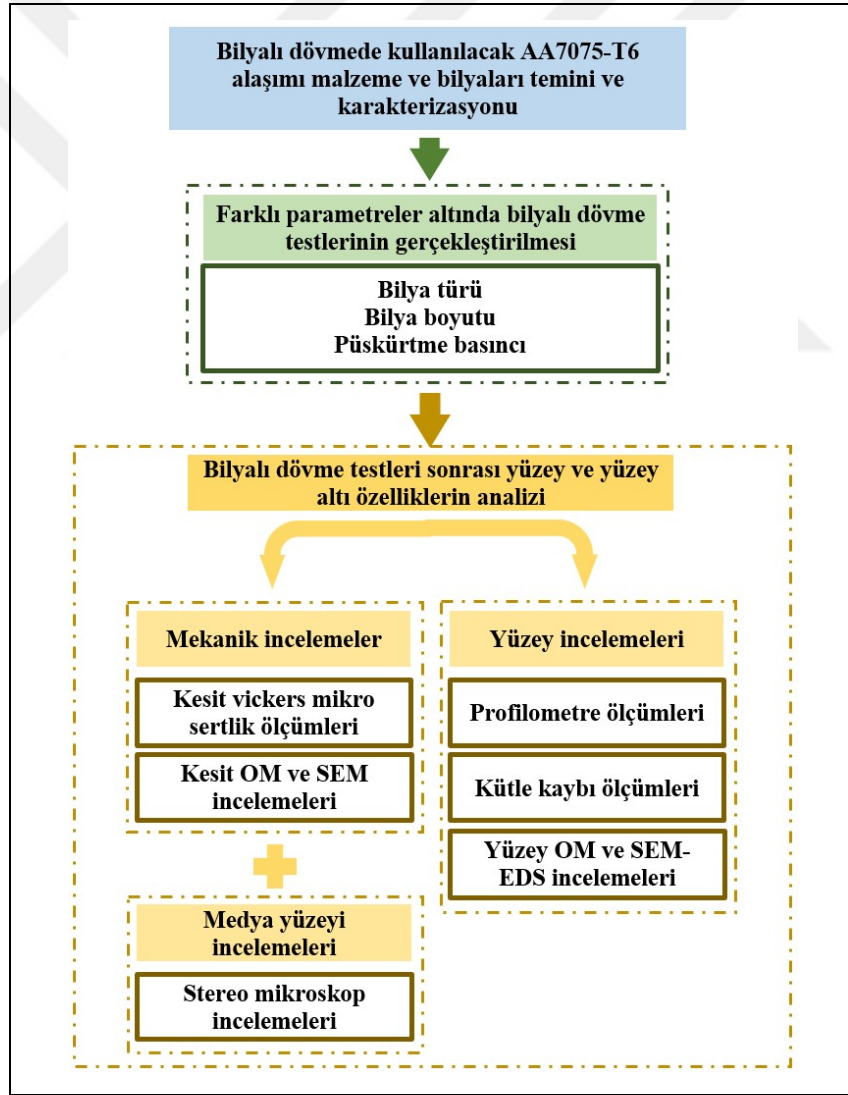
### 3.3. Literatür Çalışmalarının Nihai Sonuçları

Literatürde bilyalı dövme işleminin AA7xxx serisi alaşımların yüzey özelliklerinin yorulma dayanımı ve mekanik özelliklerine etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir ancak literatürde bilyalı dövme ile meydana gelen plastik deformasyona bağlı olarak değişen sertlik miktarı ve sertlik etki derinliğinin medya türü boyutu ve deformasyon miktarına bağlı değişimi ve bu özelliklerin yüzey özellikleri ile ilişkilerinin incelenmesi üzerine gerçekleştirilmiş detaylı bir çalışma bulunmamaktadır.

Metal ve alaşımlarının yüzeylerinin bilyalı dövme işlemi ile aşırı deforme edilmesi sonucunda yakın yüzey altı tabakasında sertlik ve kalıntı gerilme artışı sağlandığı, bunun sonucunda yorulma dayanımının geliştirildiği literatürde açıkça belirtilmiştir. Aynı zamanda literatürde bilyalı dövme işleminin yüzey topografyasını değiştirmesi ve pürüzlülük artışına neden olmasının yorulma dayanımına olumsuz etkisinin olduğu bildirilmiştir [15, 16]. Bu durum “Al alaşımlarının mekanik özelliklerine bilyalı dövme işleminin etkileri” üzerine son yıllarda literatürde pek çok çalışma gerçekleştirilmesini sağlamıştır ancak bilyalı dövme işlemi ve işlem parametrelerinin yüzey ve yüzey altı özelliklere (yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi, yüzey ve yüzey altı sertliği, mikro yapısı ve kalıntı gerilmesi) etkileri üzerine sınırlı sayıda çalışma yer almaktadır. Bu tez çalışması kapsamında paslanmaz çelik bilyalara alternatif olarak cam küreler de kullanılarak, farklı bilya türü, bilya boyutu ve püskürtme basıncının, AA7075 alaşımının yüzey altı sertlik değişimine ve yüzey özelliklerinin değişimine etkisi incelenmiştir. Kesit sertlik ve yüzey topografyası değişiminin kök nedenleri ve dövme işlem parametrelerinin bu özelliklere etkileri literatür çalışmaları ile tartışılarak ortaya konmuştur.

#### 4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan materyaller ve deneysel yöntemler detaylı olarak açıklanmıştır. Bu bölümde sırası ile; i.) gerekli sarf malzemelerin temini, boyutlandırılması ve karakterizasyon çalışmaları, ii.) belirlenen parametreler doğrultusunda gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri (farklı bilya türü ve boyutu, farklı püskürtme basıncı), iii) bilyalı dövme sonrası numune yüzey ve yüzey altı özelliklerinin incelenmesi için kullanılan yöntemler açıklanmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların akış şeması

Bilyalı dövme sonrası karakterizasyon çalışmaları; i) mekanik karakterizasyon çalışmaları (kesit Vickers mikro sertlik ölçümleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop (OM) incelemeleri), ve ii) yüzey karakterizasyon çalışmaları (temaslı uçlu profilometre ölçümleri, yüzeyden kütle kaybı ölçümleri, SEM-EDS ve OM incelemeleri) olmak üzere iki ana başlık altında gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1. Malzeme

##### 4.1.1. Alüminyum alaşımı numuneler

Tez çalışmasında kullanılan AA7075-T6 alaşımı 25 mm çaplı çubuk olarak Teksa Metal ve Plastik Ürünleri İmalat San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasından tedarik edilmiştir. Alaşıma ait kimyasal kompozisyon ve mekanik özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir. AA7075-T6 alaşımı, Kar Metal marka yarı otomatik şerit testere (M42 27\*0,9\*3000) ile kuru olarak 10 mm kalınlığında dilimlere ayrılmıştır. Kesme işlemine bağlı malzeme yüzeyinde meydana gelen deformasyonlarının giderilmesi amacı ile numunelere alın torna işlemi uygulanmış, daha sonra sırasıyla 600 ve 1000 mesh’lik zımparalar ile zımparalanarak numune yüzeyleri bilyalı dövmeye hazır hale getirilmiştir.

Tablo 4.1. Tez çalışmalarında kullanılan AA7075 alaşımının kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

Kimyasal kompozisyon										
Elementler (Kütlece %)	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Ti	Cr	Zr
	87,1- 91,4	5,1- 6,1	2,1- 2,9	1,2- 2	En fazla 0,5	En fazla 0,4	0,3	0,2	0,18- 0,28	0,05
Mekanik özellikler										
Sertlik (Vickers)	Akma dayanımı (MPa)		Çekme dayanımı (MPa)		Kopmada uzama (%)		Elastisite modülü (GPa)			
175-180	500		560		7		71			

##### 4.1.2. Bilyalar

Bilyalı dövme işlemleri için endüstriyel uygulamalarda ve bilimsel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelik bilyalar ile paslanmaz çelik bilyalara karşı alternatif olarak kullanılması ön görülen ve literatürde görece daha az çalışılmış olan

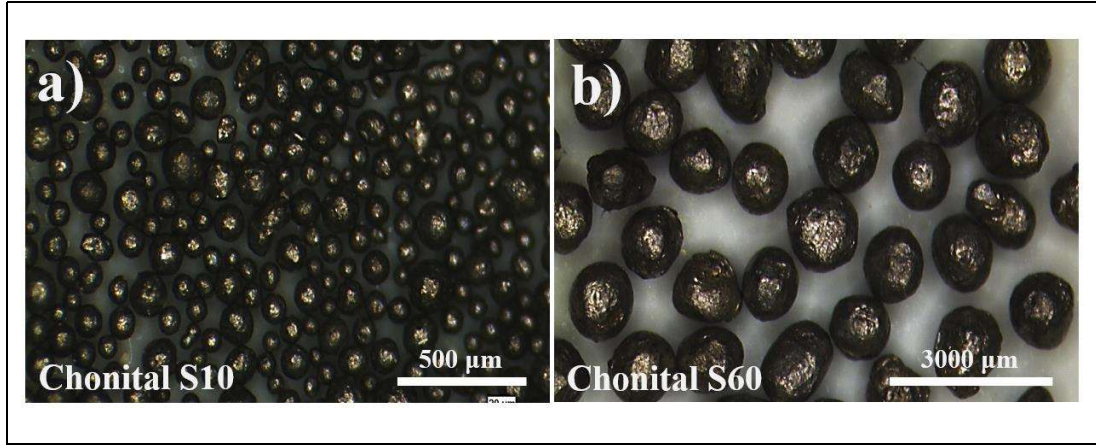


cam küre bilyalar kullanılmıştır. Medyaların seçiminde endüstriyel uygulamalarda yaygın kullanım alanı buluyor olmaları ve farklı mekanik özelliklere (sertlik, kırılma tokluğu vb.) sahip olmaları belirleyici kriterler olmuştur. Belirtilen bu özelliklerin AA7075 alaşımının bilyalı dövme davranışına etkilerinin incelenmesi ve medyaların seçiminin etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Öte yandan bilya boyutu seçiminde geleneksel ve güncel bilyalı dövme uygulamalarına (ince taneli bilyalı dövme, yüksek enerjili bilyalı dövme gibi) uygun olacak boyutlu bilyalar seçilmiştir. Bu bölüm içerisinde temin edilen medya türlerine ait bilgiler ve gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmalarına ait veriler verilerek medya türlerinin seçimi ve özellikleri ile ilgili detaylı açıklamalar yapılmıştır.

Paslanmaz çelik bilyalar yüksek sertlik, yüksek kırılma tokluğu ve yüksek plastik deformasyon özelliği gösteren, küresel/küresele yakın morfolojiye sahip ve hedef malzeme yüzeyinde dövme işlemi sonrası düşük kirlilik bırakan malzemelerdir. Endüstride döküm, gemi imalat, otomotiv, makine imalat ve biyomedikal gibi pek çok alanda kullanılmaktadırlar. Tez çalışmalarında kullanılan paslanmaz çelik bilyalar Fetaş Metalurji firmasından temin edilmiş olup fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşenleri Tablo 4.2’de verilmiştir. S10 ve S60 kodlu paslanmaz çelik bilyaların morfolojileri Kocaeli Üniversitesi, Malzeme Laboratuvarı’nda bulunan stereo mikroskop ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2).

Tablo 4.2. Bilyalı dövme çalışmalarında kullanılan Chronital paslanmaz çelik bilyaların kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

Ticari adı	Chronital S10 (50-200 µm), Chronital S60 (700-1200 µm)						
Tanımı	Paslanmaz çelik bilya (Atomizasyon işlemi ile dökülmüş paslanmaz yuvarlak çelik bilya)						
Mikroyapısı	Östenitik						
Kimyasal Bileşenleri (kütlece %)	C	Cr	Si	Mn	Ni	S	P
	0,17	18,0	<1,8	<1,2	8,0-10,0	<0,03	<0,04
Özgül Ağırlığı (kg/cm <sup>3</sup> )	7,90						
Sertlik (HV) (EN ISO 6507-1)	450						

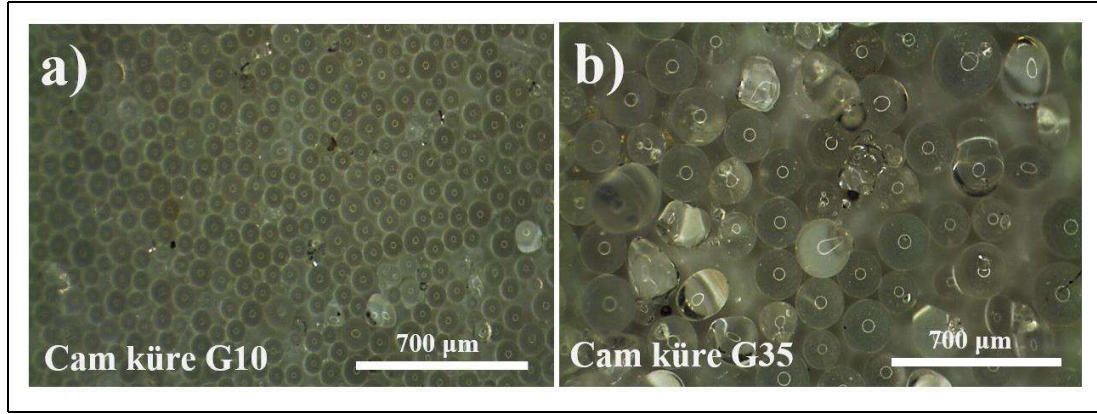


Şekil 4.2. Bilyalı dövme çalışmalarında kullanılan bilyaların stereo mikroskop görüntüleri; a) Chronital S10 paslanmaz çelik bilyalar (50-200 µm) b) Chronital S60 paslanmaz çelik bilyalar (700-1200 µm)

Cam küreler sert, kırılğan ve hedef malzeme yüzeyiyle tepkimeye girmeyen yüksek küresel morfolojiye sahip malzemelerdir. Düşük yoğunlukta ve toklukta olmaları nedeniyle deformasyon kabiliyetleri nispeten düşüktür. Endüstride özellikle alüminyum alaşımlarının bilyalı dövülmesinde yaygın olarak tercih edilmektedirler. Cam küreler Saykar Metalurji firmasından temin edilmiş olup boyutları, fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşenleri Tablo 4.3’de verilmiştir. G10 ve G35 kodlu cam kürelerin morfolojileri Kocaeli Üniversitesi, Malzeme Laboratuvarı’nda bulunan stereo mikroskop ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.3).

Tablo 4.3. Bilyalı dövme çalışmalarında kullanılan cam kürelerin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

Tane geometrisi	Küresel							
Boyut	Cam küre G10 (70-110 µm), Cam küre G35 (300-400 µm)							
Kimyasal Bileşenleri (kütlece %)	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
	72,0-73,0	13,3-14,3	0,2-0,6	7,2-9,2	3,5-4,0	0,8-2,0	0,08-0,11	0,2-0,3
Özgül Ağırlığı (kg/cm <sup>3</sup> )	2,45							
Sertlik (HRC)	47							
Sertlik (HV)	~470							



Şekil 4.3. Bilyalı dövme çalışmalarında kullanılan bilyaların stereo mikroskop görüntüleri; a) G10 (70-110 µm) cam küreler, b) G35 (300-400 µm) cam küreler

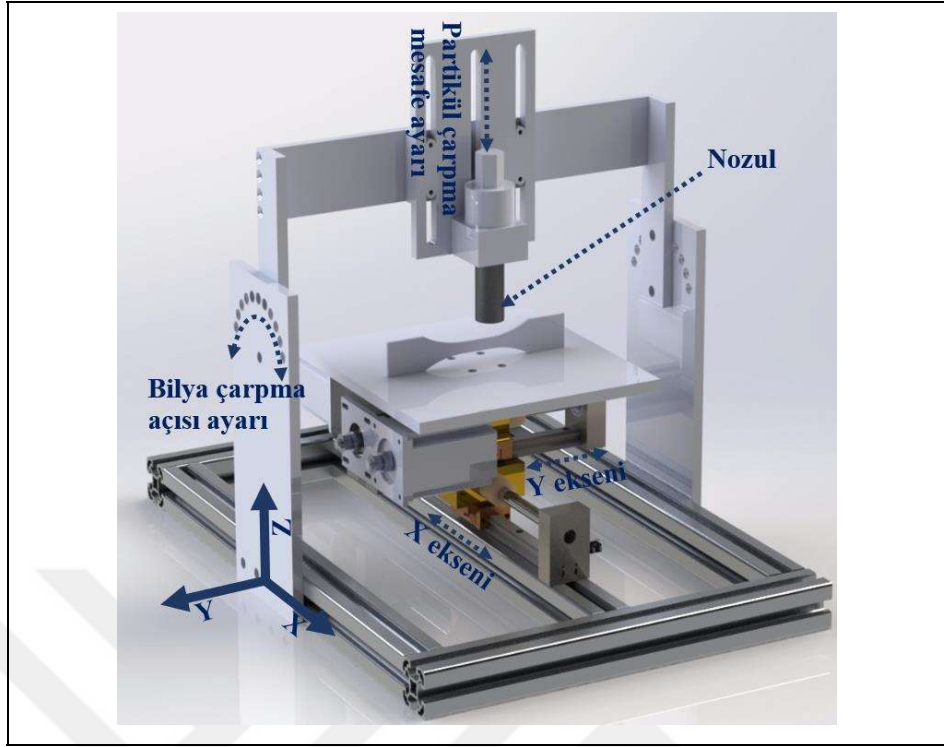
## 4.2. Yöntem

### 4.2.1. Bilyalı dövme işlemleri

Bilyalı dövme işlemleri Kocaeli Üniversitesi, Ford Otosan İhsaniye Otomotiv MYO, Yüzey İşlemleri Laboratuvarı' nda bulunan özel olarak tasarlanmış CNC kontrollü yerçekimli enjektör nozul sistemli bilyalı dövme test düzeneği ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.4). AA7075 alaşımı numuneler bilya türü, bilya boyutu ve bilya püskürtme basıncının etkisinin araştırılması amacı ile farklı parametreler altında dövülmüştür (Tablo 4.4) ve tüm testler 2'şer tekrarlı olarak yapılmıştır. Bilya çarpma açısı (30° ve 90°), bilya püskürtme mesafesi (40 mm) ve dövme süresi (60 sn) sabit tutulmuştur.

Tablo 4.4. Bilyalı dövme işlemlerinde kullanılan parametreler

Test Gurubu	Bilya Türü	Bilya Boyutu	Püskürtme Basıncı (Bar)
1	Cam Küre	G10 (70-110 µm)	2
2			7
3		G35 (300-400 µm)	2
4			7
5	Paslanmaz Çelik Bilya	S10 (50-200 µm)	2
6			7
7		S60 (700-1200 µm)	2
8			7



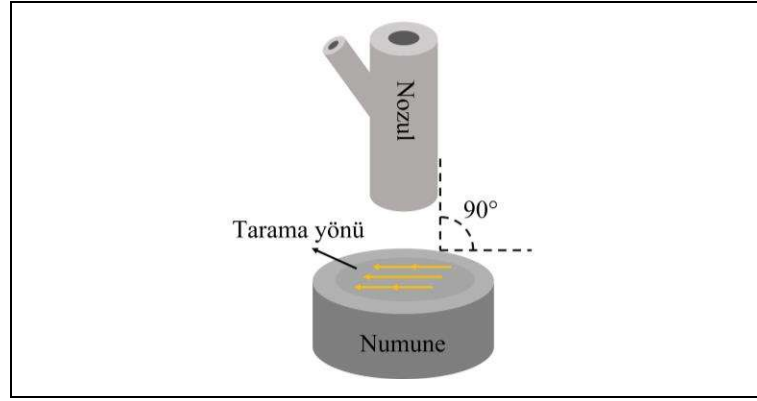
Şekil 4.4. Bilyalı dövme işlemleri için kullanılan özel tasarlanmış CNC kontrollü bilyalı dövme test sistemi şematik gösterimi

#### 4.2.2. Kütle kaybı ölçümleri

Bilyalı dövme işlemi her ne kadar hedef malzeme yüzeyini plastik deforme ediyor olsa da işlem süresince operasyon parametrelerine ve medya türüne bağlı olarak yüzeyden sınırlı bir miktarda malzeme uzaklaşmasına da neden olmaktadır. Bu neden ile dövme işlemleri sonrasında kütle değişimleri bilyalı dövme işlemleri öncesinde ve sonrasında numuneler Shimadzu ATX-224 marka hassas terazi ile tartılarak belirlenmiştir.

#### 4.2.3. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Bilyalı dövme sonrası yüzeylerin pürüzlülük değerleri Mitutoyo Surfes SJ-310 marka pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Cihaz temaslı uçlu olup numune yüzeyinde 4 mm uzunluğunda bir çizgi taranmıştır. Çizgisel pürüzlülük değerleri her numune merkezinden paralel olarak üç ölçümün aritmetik ortalaması ve standart sapmaları hesaplanarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi pürüzlülük değerleri alınırken dövme yönünde ve dövme yönüne dik olarak 3'er ölçüm yapılmıştır.



Şekil 4.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm metodolojisi şematik gösterimi

#### 4.2.4. Metalografik hazırlık

Bilyalı dövülen numuneler kesit sertlik ve mikroyapı incelemeleri için Metkon marka hassas kesme cihazı ile elmas kesme diski kullanılarak kesilerek, soğuk bakalite alınmış ve kesit yüzeylerine zımpara (320, 600, 1200 mesh lik zımparalar) - parlatma (1 ve 3 mikron elmas süspansiyon ve uygun çuhalar) işlemleri uygulanmıştır. Parlatılan numuneler 15 dakika süre ile ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Numuneler daha sonra Keller dağlayıcısı ile 60 sn dağlanmış. Keller dağlayıcısının içeriği 2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO<sub>3</sub>, 190 ml H<sub>2</sub>O olarak hazırlanmıştır.

#### 4.2.5. Kesit mikro sertlik incelemeleri

Bilyalı dövme işlemleri sonrası AA7075 alaşımının yüzey ve yüzey altı deformasyona bağlı sertlik değişiminin incelenebilmesi amacı ile numuneleri kesit Vickers mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği' nde bulunan Vickers mikro sertlik cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kesit sertlik ölçümlerinde numune yüzeyinden merkeze doğru 50 µm adım aralıklarıyla HV<sub>0,1</sub> yük 15 sn uygulayarak sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6). Ölçümler her derinlik noktasından malzemenin heterojen yapısı ve ölçüm kaynaklı hatalar dikkate alınarak her numunenin merkezinden 3 tekrar alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6). Bilyalı dövme sonucu malzeme yüzey altı bölgesinde meydana gelen kalıntı gerilmeler, Vickers izinin bir miktar deformasyona uğramasına neden olmaktadır [68]. Bu nedenle ölçüm sonuçları ölçüm hataları dikkate alınarak düzenlenmiş ve derinliğe bağlı sertlik grafikleri elde edilmiştir .



## **5. BULGULAR VE TARTIŞMA**

Tez çalışması kapsamında bilya türü, bilya boyutu ve püskürtme basıncının AA7075 alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerine olan etkisinin derinlemesine incelenmesi hedeflenmiştir. Günümüzde endüstriyel bilyalı dövme uygulamalarında paslanmaz çelik, cam küre ve seramik bilya türleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı elastik modül, kırılma tokluğu, mukavemet, yoğunluk vb. özelliklere sahip medyalarla, bilyalı dövme işlemin kontrollü ve tekrarlı çarpma olarak gerçekleştirilen bir işlemi olduğu dikkate alındığında hedef malzemelerin yüzey ve yüzey altı özellikleri üzerinde farklı sonuçlara neden olduğu ortadadır.

Bu bölüm içerisinde ilk olarak yüzey ve yüzey altı sertliği ile yüzey ve yüzey altı sertliğinin değişmesine neden olan malzeme yüzey altı kesit mikroyapısı incelenmiştir. Daha sonra bilyalı dövülen AA70705 alaşımının yüzey pürüzlülüğü, yüzey tekstürü ve morfolojisi ile dövme sonrası dövme medyalarının yüzeyleri ve bilyalı dövme sonrası kütle değişimleri incelenmiş ve tartışılmıştır.

### **5.1. Bilyalı Dövme Sonrası Kesit Özelliklerinin İncelenmesi**

#### **5.1.1. Bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altı sertliğin değişimi**

Bilyalı dövme işlemi ile yüzey ve yüzey altı bölgede meydana gelen plastik deformasyonlar, metal ve alaşımlarının sertliğinde önemli artışlara neden olur. Bu durum bilyalı dövme işleminin önemli sonuçlarından biri olarak bilinmektedir [42, 85, 86]. Sertlikteki artış metal ve alaşımlarının aşınma ve yorulma dayanımının geliştirilmesine katkı sağlar [57]. Literatürde yaygın olarak bilyalı dövme sonrası artan sertlik artışının yorulma dayanımı üzerinde olumlu etkisi olduğu belirtilmesine rağmen, gerçekleştirilen çalışmalarda ağırlıklı olarak yüzey altı kalıntı gerilme incelemeleri gerçekleştirilmiş ve farklı parametreler altında değişen kalıntı gerilme profillerinin metal ve alaşımlarının yorulma davranışları üzerindeki etkileri detaylı şekilde tartışılmıştır. Buna karşın, bilyalı dövme işleminin ve işlem parametrelerinin yüzey altı sertlik değerlerine etkileri üzerinde çok fazla durulmamıştır.



Tablo 5.1. Literatürde AA7xxx serisi alaşımların kesit sertliği incelemeleri üzerine yapılan çalışmaların önemli noktaları

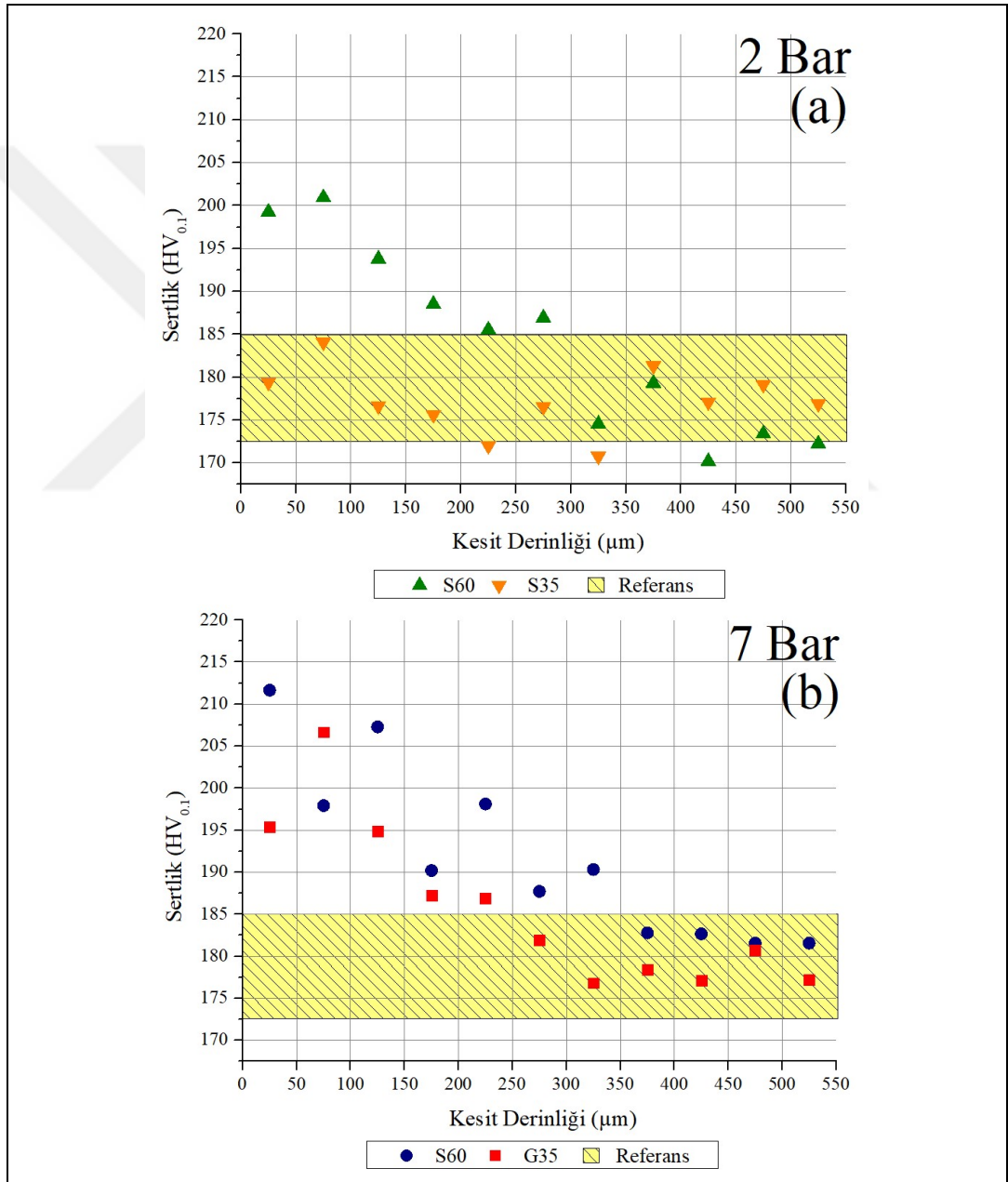
Yayın bilgileri	Yayının temel amacı	Kullanılan Yöntem	Bilyalı dövme işlemi detayları	Gözlemlenen sertlik değişimi	Sertlik değişiminin meydana geldiği derinlik
Beneddetti ve ark, 2009 [59]	Yorulma davranışının incelenmesi	Bilyalı dövme	Farklı boyutlu seramik bilyaların etkisi	Parametrelere bağlı olarak 175-180 Hv'den 190-200 Hv'ye sertlik artışı	Maks. 200 $\mu$ m
Guagliano ve ark, 2009 [86]	Kalıntı gerilme ve mikroyapı değişiminin incelenmesi	Bilyalı dövme	Farklı dövme sürelerinin etkisi	Parametrelere bağlı olarak %20 - 37 oranında sertlik artışı	Max 240 $\mu$ m
Wagner ve ark, 2011 [74]	Yüzey tabakasının ve yorulma davranışının incelenmesi	Bilyalı dövme Lazer dövme Bilyalı parlatma Ultrasonik dövme	Farklı mekanik yüzey işleme yöntemleri ile 0.20 mmA almen deri elde edilmiş	Belirgin bir değişim gözlenmemiş	-
Zupanc ve ark, 2011 [42]	Dövmeye bağlı sertlik değişiminin yorulma davranışına etkisi	Bilyalı dövme	Farklı Almen şiddetlerinin etkisi	Parametrelere bağı olarak %20 - 25 oranında sertlik artışı	350 $\mu$ m
Vazquez ve ark, 2012 [68]	Aşınma yorulma davranışına etkisi	Bilyalı dövme Lazer dövme	Çelik bilya – 25A Çelik bilya + cam küre 35A	%20 sertlik artışı	100-200 $\mu$ m
Suh ve ark, 2015 [87]	Yorulma davranışının incelenmesi	Bilyalı dövme	Bilya püskürtme basıncı (15 psi – 25 psi)	Parametrelere bağı olarak %11,2 - 14,3 oranında sertlik artışı	350 $\mu$ m
Beneddetti ve ark, 2015 [88]	Yüksek çevrimli yorulma davranışına etkisi	Bilyalı dövme	Seramik ve cam bilyalar ile, farklı boyut ve almen şiddetinde	180 Hv'den 190-200 Hv'ye sertlik artışı	-
Pandey ve ark, 2017 [89]	Düşük çevrimli yorulma davranışına etkisi	Ultrasonik dövme	-	154 Hv'den 177 Hv'ye sertlik artışı	-
Ferreira ve ark, 2020 [41]	Yorulma davranışına etkisi	Bilyalı dövme	Paslanmaz çelik ve cam bilyalar, farklı boyutlarda	%10 sertlik artışı	Max 80 $\mu$ m



AA7xxx serisi alaşımların bilyalı dövülmesi üzerine Scopus® bilimsel makale veri tabanına göre son 20 yılda 55'in üzerinde yayın yapılmıştır ancak çalışmaların çoğu bir önceki paragrafta da belirtildiği gibi genellikle kalıntı gerilme ve yorulma üzerine gerçekleştirilmiş olup, kesit sertlik artışına ve sertlik derinliğine; bilya türü, bilya boyutu ve püskürtme basıncının etkilerini ve kök nedenlerini inceleyen yayın sayısı oldukça sınırlıdır. AA7xxx alaşımının bilyalı dövme sonrası sertlik değişimine medya türünün etkisi üzerine gerçekleştirilen sınırlı sayıda çalışma ile ilgili önemli bilgiler Tablo 5.1'de özetlenmiştir. Tez çalışmasında bu önemli araştırma sorusunun açığa çıkarılması için AA7xxx alaşımının bilyalı dövme sonrası sertlik değişimleri farklı parametreler altında dövülen numunelerin kesit profilleri alınarak yüzeyden merkeze doğru olan sertlik ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri ile irdelenmiştir.

Bilya türü ve basıncının yüzey altı sertlik değerlerine etkisinin ortaya konması amacı ile büyük boyutlu medyaların (büyük cam ve büyük bilya), sabit dövme süresinde (60 sn), sabit bilya çarpma açısında (90°), 2 ve 7 barlık püskürtme basınçlarında gerçekleştirilen dövme işlemleri sonrasında kesit sertlik eğrileri çıkarılmıştır (Şekil 5.1). Her iki medya türünde de püskürtme basıncının artması ile yüzey ve yüzey altı sertliğinin yaklaşık olarak 20 HV<sub>0,1</sub> arttığı ve bilyalı dövme işlemine bağlı sertlik artışının medya türü ve basınca bağlı olarak 300-450 µm derinliğine kadar devam ettiği görülmektedir. Püskürtme basıncının bilyaların kinetik enerji miktarını arttırdığı ve bu durumun deformasyon miktarını etkilediği açıktır. Bilya hızındaki artışın bilyaların darbe enerjisini ve etkin olduğu derinliği arttırmakta, bu durum deformasyon miktarını arttırarak alüminyum alaşımının sertliğinde artışa neden olmaktadır [58]. Ullah ve ark. [58] bilya özkütlesinin medya kinetik enerjisi üzerinde büyük bir etkisi olduğunu belirtmektedir. Yüksek özkütleli (çelik bilya gibi) medyaların çarpma anındaki kinetik enerjisinin daha yüksek olduğu ve bunun malzeme yüzeyinde oluşturduğu darbe basıncını arttırdığı belirtilmiştir. Gerçekleştirilen modelleme çalışmalarına göre cam ve çelik bilyalar ile dövülen malzeme için (2618-T61 alaşımı) yüzeyde aynı kalıntı gerilme elde edilirken yüzey altına etki tesiri olarak çeliğin cam kürelere göre daha efektif olduğu görülmüştür [58]. Ayrıca plastik deformasyon miktarı çelik bilyalarda cam medyaya göre daha yüksek olmasının nedeni çelik bilyaların daha yüksek kinetik enerjiye sahip olmaları ile açıklanmış, yüzeye çarpan bilyaların ağırlığındaki artış ile daha derine etki edebileceği öne sürülmüştür. Kalıntı basma gerilmesi değerlerinin her

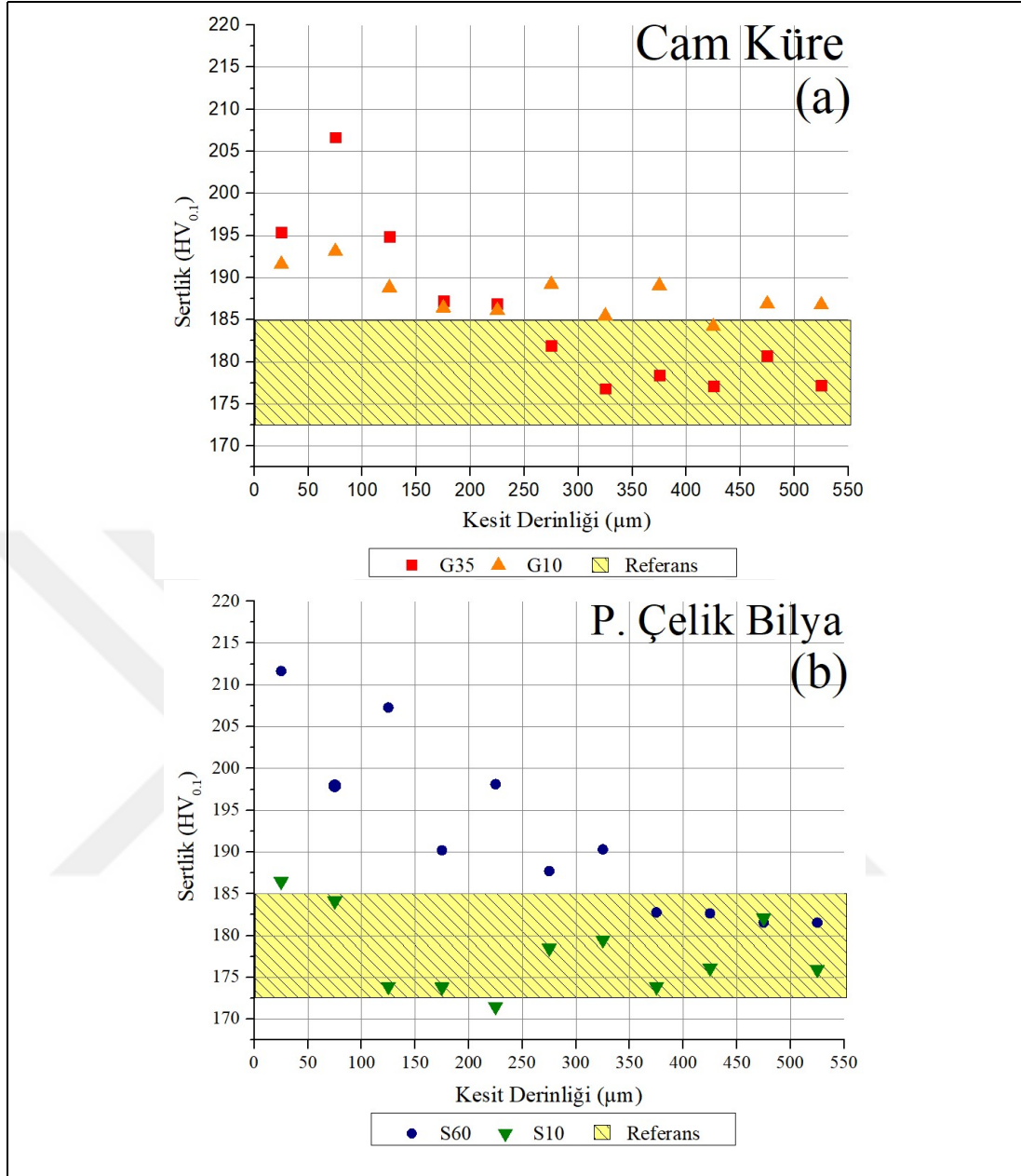
iki medya için aynı olmasına rağmen, özkütlesi yüksek olan medyanın (çelik) bilya daha derine etki edebildiği ve plastik deformasyon kabiliyetinin daha yüksek olduğu açıklanmıştır [58]. Tez çalışmasında farklı medyalar ile dövülen alüminyum alaşımında derinliğe bağlı meydana gelen sertlik değişiminin bilyalı dövme ile meydana gelen plastik deformasyon miktarı ile doğrudan ilişkili olduğu düşünüldüğünde, elde edilen sonuçların tutarlı olduğu ve literatürde yer alan bu çalışmalar ile örtüştüğü görülmektedir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Farklı püskürtme basınçlarında paslanmaz çelik bilya (S60) ve cam küre (G35) ile bilyalı dövülen numunelerde sertliğin derinliğe bağlı değişimi, sabit dövme süresi (60 sn) ve sabit bilya çarpma açısı (90°) a) 2 bar, b) 7 bar

Bilya türü ve boyutunun etkisinin ortaya konması amacı ile sabit dövme süresi (60 sn), püskürtme basıncı (7 bar) ve bilya çarpma açısı (90°) altında gerçekleştirilen dövme işlemleri incelenmiştir (Şekil 5.2). Sertlik artışına etki eden en önemli parametrenin bilya boyutu olduğu, büyük bilya ve büyük cam küre ile gerçekleştirilen dövme işlemlerinde daha yüksek sertlik artışının sağlandığı görülmektedir. Bilyalı dövme ile sertlik artışının temel nedeni, tekrarlı şekilde malzeme yüzeyine çarpan bilyaların yüzey ve yüzey altında neden olduğu yüksek miktardaki plastik deformasyonudur [42, 85, 86]. Meydana gelen deformasyonun miktarı ve derinliği, bilyaların sahip olduğu kinetik enerji ve boyutları ile doğrudan ilgilidir [58]. Kikuchi ve ark. [90] bilya boyutu arttıkça bilya hızının ve bilya hızındaki artışın azaldığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada farklı boyutlardaki bilyaların basınca bağlı hızları ölçülmemiştir ancak gerçekleştirilen çalışma kapsamında medya boyutunun sertlik değişimini etkilediği her iki medya türü için görülmektedir (Şekil 5.2). Beneddetti ve ark. [59] bilya boyutuna bağlı sertlik miktarı ve derinliğindeki değişimin bilya boyutu artışı ile artan Hertzian basıncına bağlı olarak değiştiğini öne sürmüştür. Bu çalışmada bilya çapı artışının sertlik iyileşmesini daha da arttırdığı görülmektedir. Bu doğrultuda elde edilen çalışma sonuçları değerlendirildiğinde bilya çapının artmasının Kikuchi ve arkadaşlarının belirttiği gibi bilya çarpma hızlarını düşürebileceği ancak diğer yandan bilya boyutu artışı ile Hertzian basıncının artabileceği öngörülebilir. Bu çalışmada bilya boyutu artışı ile deformasyon miktarının ve derinliğinin arttığı, bunun sonucunda da sertlik değerlerinde artış gözlemlendiği sonucu ortaya çıkmıştır.

AA7075 alaşımının sertliğine en çok etki eden grubun büyük çelik bilyalar olduğu ve sertlik değerinin bilyalı dövmenin en etkin olduğu yüzeye yakın bölgelerde 215 HV<sub>0,1</sub> değerine ulaşarak alaşımın yüzey sertliğinde %22' lik bir artış sağladığı görülmektedir ancak belirtilen yüksek sertlik değerleri 50 µm' dan sonra keskin bir düşüş göstermiştir. Büyük cam küreler alaşımın yüzey sertliğini 195 HV<sub>0,1</sub> değerine çıkararak alaşımın yüzey sertliğinde %14.28' lük bir artış sağlamıştır. Küçük cam küre ve çelik bilyalar ile gerçekleştirilen dövme işlemleri sonrasında yüzey ve yüzey altı sertliğinde bir miktar artış olduğu (sırasıyla %10 ve %7.14) ancak bu değerlerin büyük medyalar ile kıyaslandığında sınırlı olduğu söylenebilir.



Şekil 5.2. Farklı boyutlu paslanmaz çelik bilya (S10 ve S60) ve cam küre (G10 ve G35) ile bilyalı dövülen numunelerde sertliğin derinliğe bağlı değişimi, sabit dövme süresi (60 sn), püskürtme basıncı (7 bar) ve bilya çarpma açısı (90°), a) cam küre, b) paslanmaz çelik bilya

Dövmeye bağlı sertlik artışının, bilya türü ve boyutuna bağlı olarak 350-400 µm derinliğine kadar devam ettiği bu derinlikten sonra referans malzeme sertliği olan 180-175 HV<sub>0.1</sub> değer aralığına indiği görülmektedir. Bilyalı dövme işlemi bilyalar ve hedef malzeme arasında gerçekleşen bir çarpışma olarak dikkate alındığında, bilya sertliğinin ve tokluğunun hedef malzeme mekanik özellikleri kadar önemli olduğu ayrıca bilyaların da hedef malzeme gibi deforme olma ihtimalinin olduğu açıktır [58].

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar incelendiğinde farklı medya ve basınç türleri ile benzer sertlik değerleri elde edildiği görülmüştür (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2). Bu durum bilyalı dövmenin sertlik değişimine etkisinin pek çok parametrenin karmaşık ilişkisinin bir sonucu olduğunu ortaya koymuştur.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, Ullah ve ark [58], çelik bilyaların özkütlelerine bağlı olarak cam kürelere kıyasla daha yüksek kinetik enerji ile alaşımın yüzeyine çarpması nedeniyle bilya çarpma derinliğinin daha yüksek olduğunu bu durumun daha çok plastik deformasyona neden olduğu belirtilmiştir. Öte yandan, Sawada [91] gerçekleştirdiği çalışmada yüksek Young modülü olan bilyaların daha yüksek kalıntı basma gerilmesi oluşturduğu belirtilmiştir. Bu noktada bilyaların sahip olduğu enerjiyi çarpma sırasında bilyanın plastik deformasyonuna veya kırılmasına harcamadan hedef malzemeye aktarabilmesi önem taşımaktadır. Bu noktada en önemli parametrelerden biri de bilya ve hedef malzeme tokluk değerleridir. Bilya malzemesinin tokluğunun hedef malzemeye yakın veya hedef malzemedan düşük olması bilyanın da önemli ölçüde deforme olabileceği anlamına gelmektedir [58]. Yani bilya türünün de (yoğunluk ve mekanik özellikler bakımından) bilya boyutu ve püskürtme basıncı hedef malzeme sertliğinin geliştirilmesinde önemli bir parametre olduğu söylenebilir.

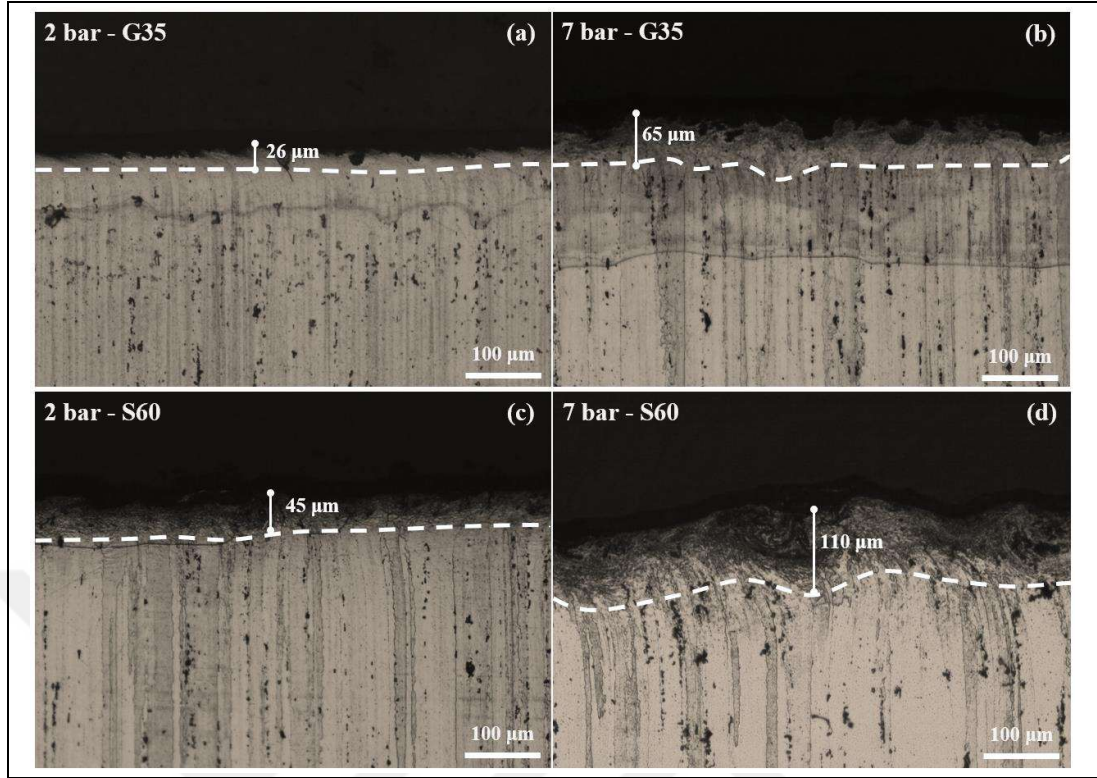
Bu kapsamda, paslanmaz çelik bilyaların cam kürelere görece yüksek yoğunlukları ve yüksek kırılma toklukları nedeniyle alaşımın yüzey ve yüzey altı sertliğinin geliştirilmesinde daha etkili oldukları söylenebilir. Cam kürelerin ise aynı operasyon parametrelerinde gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemlerinde, düşük yoğunlukları nedeniyle daha düşük kinetik enerjiye sahip olmaları, dövme işlemi sırasında kırılarak kinetik enerjilerinin bir kısmını yitirmeleri ve bu neden ile sahip oldukları kinetik enerjilerinin bir kısmını hedef malzeme yüzeyi aktarabilmeleri nedenleriyle AA7075 alüminyum alaşımının sertliğinin paslanmaz çeliklere kıyas ile daha düşük oranda arttırdıkları sonucuna varılmıştır. Ferreira ve ark. [41] AA7475 alaşımının farklı medya türleri ile bilyalı dövülmesi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, çelik bilyaların cam bilyalara kıyasla görece daha ağır olmaları nedeniyle yüzey ve yüzey altı bölgesinde daha yüksek deformasyona neden olduğunu belirtmişlerdir ancak Carvalho ve ark [10] cam ve seramik bilyalarla gerçekleştirilen dövme işlemleri sonrası AA7075-T6 alaşımının yorulma dayanımının dikkate değer ölçüde arttığını belirtmiştir.

Gerçekleştirilen sertlik çalışması sonuçları özetlendiğinde, bilyalı dövme işleminin AA7075 alaşımının yüzey ve yüzey altı sertliği arttırdığı görülmektedir. Bilya türü, bilya boyutu ve çarpma hızı parametrelerinin bilyaların sahip oldukları kinetik enerji ve momentum miktarları üzerinde önemli etkileri olduğu ve sertlik artışının bu parametrelerin karmaşık ilişkilerine bağlı değişim gösterdiği söylenebilir. Bölüm içerisinde vurgulanan tüm literatür çalışmaları göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmada sertlik değerlerinin medya türü, medya boyutu ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi ile ilgili ulaşılan sonuçlar ve bu sonuçların kök nedenleri ile ilgili kurulan ilişkilerin literatür ile tutarlı olduğu görülmektedir.

### **5.1.2. Bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altı mikroyapısının değişimi**

Bilyalı dövme ile meydana gelen sertlik artışının temel nedenlerinden birinin işlem esnasında ortaya çıkan aşırı plastik deformasyon nedeniyle değişen yüzey ve yüzey altı mikroyapısı olduğu söylenebilir [68]. Bu nedenle bu bölümde farklı şartlarda dövülen numunelerin yüzey altı mikroyapısının incelenmesi ve sertlik artışı ile ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç ile dövme işlemi gerçekleştirilen numunelerin dövme izi merkezinden kesitleri alınmış, numuneler metalografik olarak hazırlanarak optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüzey altı değişimleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmaları ile bilyalı dövme sonrası değişen yüzey altı mikroyapısı ve deformasyon mekanizmaları incelenmiş, elde edilen bulgular ışığında dövme sonrası sertlik değişiminin nedenleri tartışılmıştır.

Dövme çalışmaları kapsamında kullanılan AA7075 alaşımı numuneler ekstrüzyon çubuktan dilimler halinde kesilerek hazırlanmış, dövme işlemleri ekstrüzyon yönü doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Alaşımın kesit mikroyapısı incelendiğinde, alaşımın homojen bir yapıda olduğu, tanelerin ekstrüzyon doğrultusunda yönlendiği, uzamış tane yapısında çökeltilerin tane sınırlarında yoğunlaştıkları görülmektedir (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4). Dövme sonrası aşırı plastik deformasyon (APD) görülen alanlar şekil üzerinde beyaz çizgi ile ayrılmış ve yüzeyden derinlikleri gösterilmiştir (Şekil 5.3). Basıncın artması ile her iki medya türünde de APD bölgenin derinliğinin arttığı görülmektedir. Artan APD bölge derinliğinin bilyalı dövme şiddetinin artmasının bir sonucu olduğu söylenebilir.



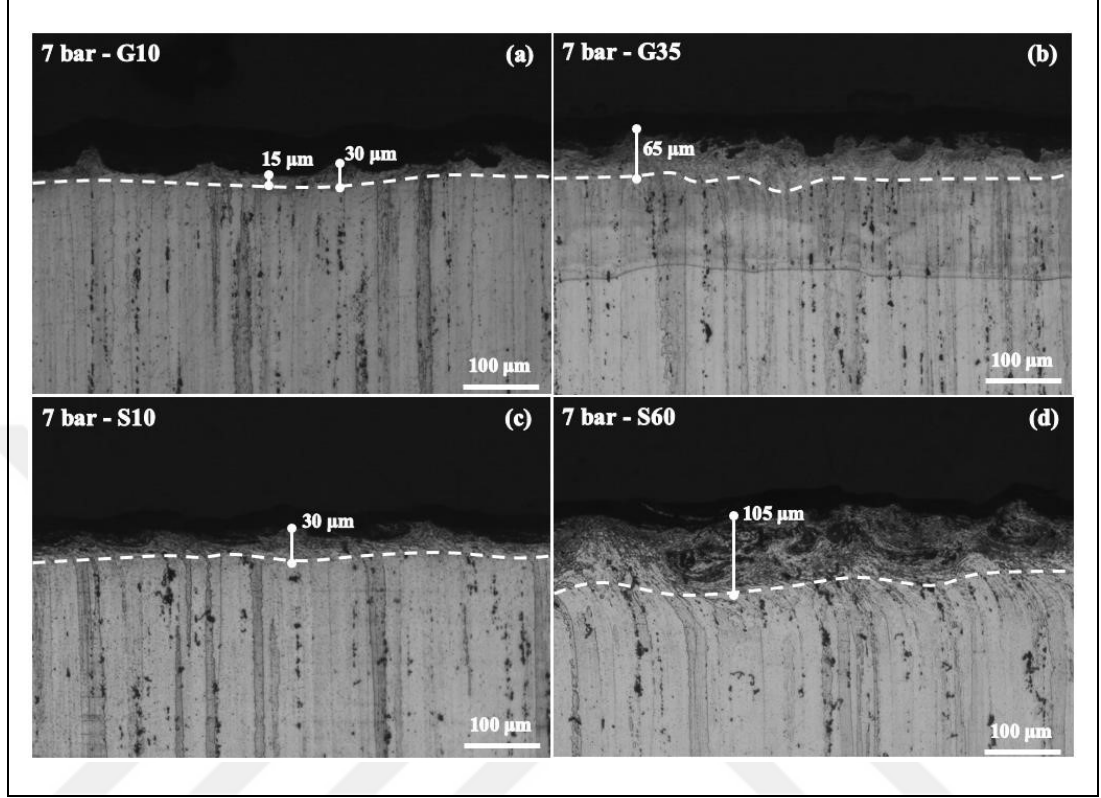
Şekil 5.3. 2 ve 7 bar püskürtme basınçlarında paslanmaz çelik bilya (S60) ve cam küre (G35) ile bilyalı dövme numunelerinin OM kesit mikroyapı görüntüleri sabit dövme süresi (60 sn) ve sabit bilya çarpma açısı ( $90^\circ$ ); a) 2 bar basınç – G35, b) 7 bar basınç – G35, c) 2 bar basınç – S60, d) 7 bar basınç – S60

Bilya boyutunun etkisi incelendiğinde (Şekil 5.4) büyük boyutlu medyalar ile gerçekleştirilen dövme işlemleri sonrası APD olan alanın derinliğinin önemli miktarda arttığı görülmektedir. Küçük bilya ve kürelerle gerçekleştirilen dövme işlemlerinde APD olan bölgenin sınırlı kaldığı görülmektedir.

Literatürde bilyalı dövme sonrası yüzey altı mikroyapısının yüzeyden malzeme merkezine gidildikçe sırasıyla, i) aşırı plastik deformasyona uğramış bölge (APD), ii) deformasyona uğramış bölge (PD), ve iii) deformasyon görülmeyen bölge olmak üzere üç bölgeye ayrıldığı belirtilmiştir. APD olan bölgelerde mikron ve nano boyutlu tanelerin yani yüksek dislokasyon yoğunluğunun olduğu, PD görülen bölgelerde tane yapılarının deformasyon doğrultusuna bağlı olarak değişim gösterdiği ve dislokasyon yoğunluğunun yine yüksek olduğu belirtilmiştir [92, 93]. Aşırı deformasyon ve dislokasyon yoğunluğu alaşımın yüzey altı sertliğinin artmasına ve kalıntı gerilme oluşmasına neden olur [33, 94]. Bu durumun dövme işlemleri sonrası artan yüzey altı



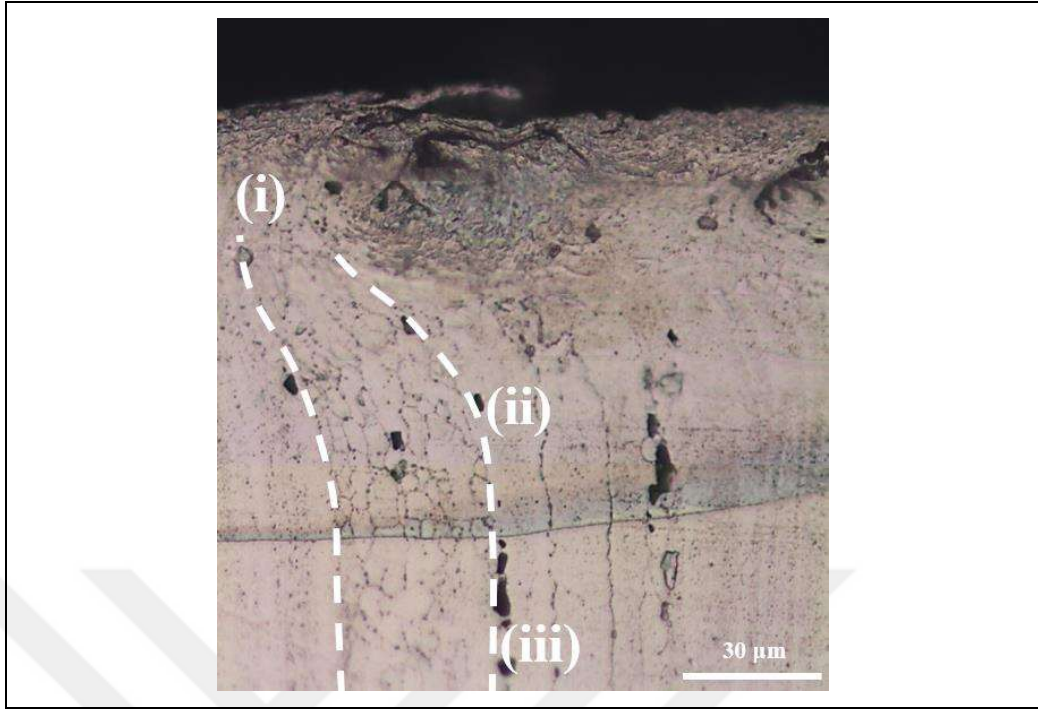
sertliğinin nedeni olduğu düşünülmektedir. Ayrıca ince tane sertleşmesinin aşınma dayanımını geliştirdiği de literatürde belirtilmiştir [95].



Şekil 5.4. Farklı boyutlu paslanmaz çelik bilya (S10 ve S60) ve cam küre (G10 ve G35) ile bilyalı dövülen numunelerin OM kesit mikroyapı görüntüleri sabit dövme süresi (60 sn), püskürtme basıncı (7 bar) ve bilya çarpma açısı (90°); a) G10, b) G35, c) S10, d) S60

Şekil 5.5’de dövme işlemleri sonrası değişen mikroyapıya ait bir görüntü verilmiştir. Sırası ile (iii) no’ lu bölgede deforme olmayan eş eksenli taneler görülmekte iken, (ii) no’ lu bölgede tanelerin deformasyona bağlı olarak uzamaya başladıkları, (i) no’ lu bölgede ise tane sınırlarının kaybolduğu ve APD bağlı olarak nano tane boyutlarına geçildiği söylenebilir. Deformasyona bağlı olarak sadece tane boyutlarının değişmediği, bu bölgelerde bulunan çökeltilerin de kırılarak matris içerisine dağıldıkları yapılan SEM çalışmalarında tespit edilmiştir (Şekil 5.6). Dövme sonrası deforme olan bölgelerin derinliği ve bu bölgelerdeki tanelerin boyutları, dövme işleminin şiddetine yani deformasyon şiddetine bağlı olarak değişmektedir [92]. Bu durumun dövülen metal ve alaşımlarının mekanik özelliklerine önemli etkisi vardır [94].

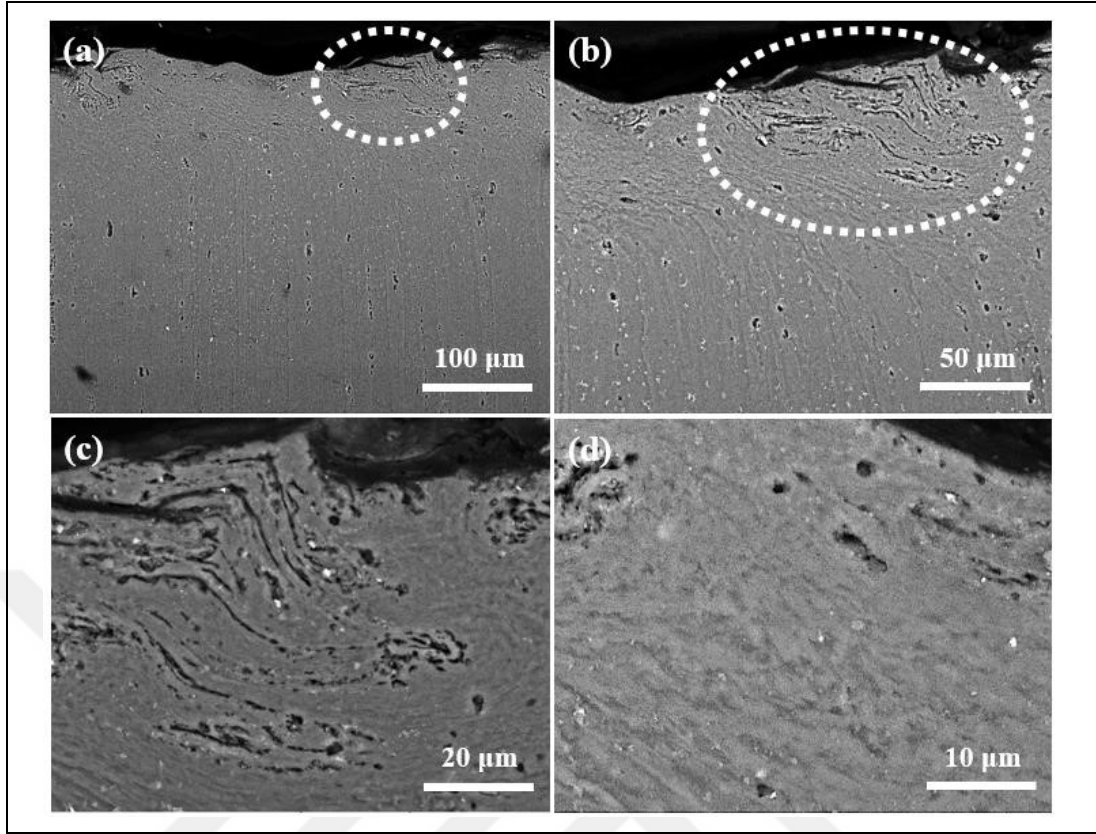




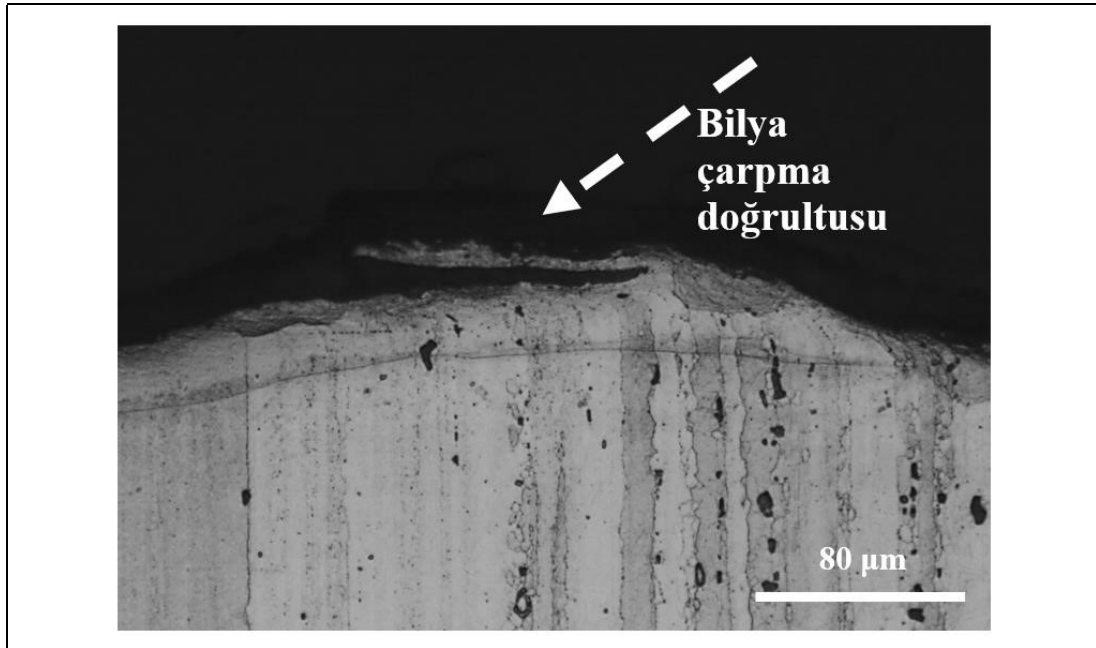
Şekil 5.5. Tane boyutunun deformasyona bağlı değişimi OM görüntüsü (500x büyütme), S60 paslanmaz çelik medya, 2 bar püskürtme basıncı, 60 sn dövme süresi, 90° bilya çarpma açısı

Deformasyon miktarı işlem parametrelerinin karmaşık ilişkisinin bir sonucudur. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda, aşırı dövme sonucu korozyon dayanımını düşürebileceği [96] ve deformasyona bağlı yüzeyde oluşan çatlakların yorulma dayanımını düşürebileceği belirtilmiştir [57, 81, 82, 94].

Tez çalışması kapsamında bilyalı dövme işlemi sırasında AA7075 alaşımının yüzeyinde meydana gelen deformasyon mekanizmalarının daha detaylı incelenebilmesi amacıyla 30° bilya çarpma açısında da bilyalı dövme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Açılı dövme işlemlerinin gerçekleştirilmesi ile dövme medyalarının hedef malzeme yüzeyini belirli bir çarpma açısı ile deforme etmesi sağlanmıştır. Yoğun deformasyon ve tekrarlı olarak yüzeye çarpan bilyalar nedeniyle gerçekleştirilen dövme işlemlerinde kulağa benzer yapıların oluştuğu görülmüştür (Şekil 5.7). Oluşan bu yapıların dövme sırasında yüzeyden koparak kütle kaybına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu yapıların kritik çatlak oluşumlarına yol açabileceği ve malzemenin yorulma dayanımını düşürebileceği söylenebilir [57, 81, 82].

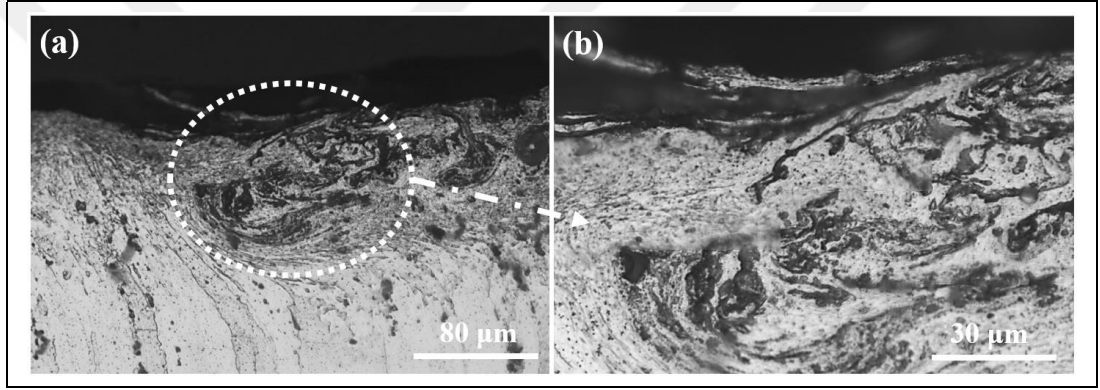


Şekil 5.6. Aşırı plastik deformasyon bölgesinde mikroyapının değişimi SEM görüntüsü (BSE modu), S60 paslanmaz çelik medya, 7 bar püskürtme basıncı, 60 sn dövme süresi, 90° bilya çarpma açısı; a) 500x büyütme, b) 1kx büyütme, c) 2.5kx büyütme, d) 5kx büyütme



Şekil 5.7. Eğik açılı dövme işlemi sonrası kulak oluşumu mekanizmasının kesit OM (200x büyütme) görüntüsü, S60 paslanmaz çelik medya, 7 bar püskürtme basıncı, 60 sn dövme süresi, 30° bilya çarpma açısı

Gerçekleştirilen yüzey altı incelemelerinde dövme şiddetinin artması ile birlikte APD bölge kalınlığının arttığı görülmüştür (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4). Bu bölgenin malzeme özelliklerini geliştirdiği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [60, 79]. Ancak deformasyon nedeniyle yer yer bu bölgelerde poroz gölgelerin oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 5.8). Bu poroz bölgelerin aşırı dövme sonucu malzeme özelliklerinin kötüleşmesine neden olan mekanizmalardan biri olduğu düşünülmektedir. Benedetti ve ark [88] AA7075 alaşımının bilyalı dövülmesi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarda, küçük boyutlu bilyaların yorulma dayanımı performansını daha çok geliştirdiğini çünkü küçük boyutlu bilyaların yüzeye daha az hasar verdiğini belirtmişlerdir.



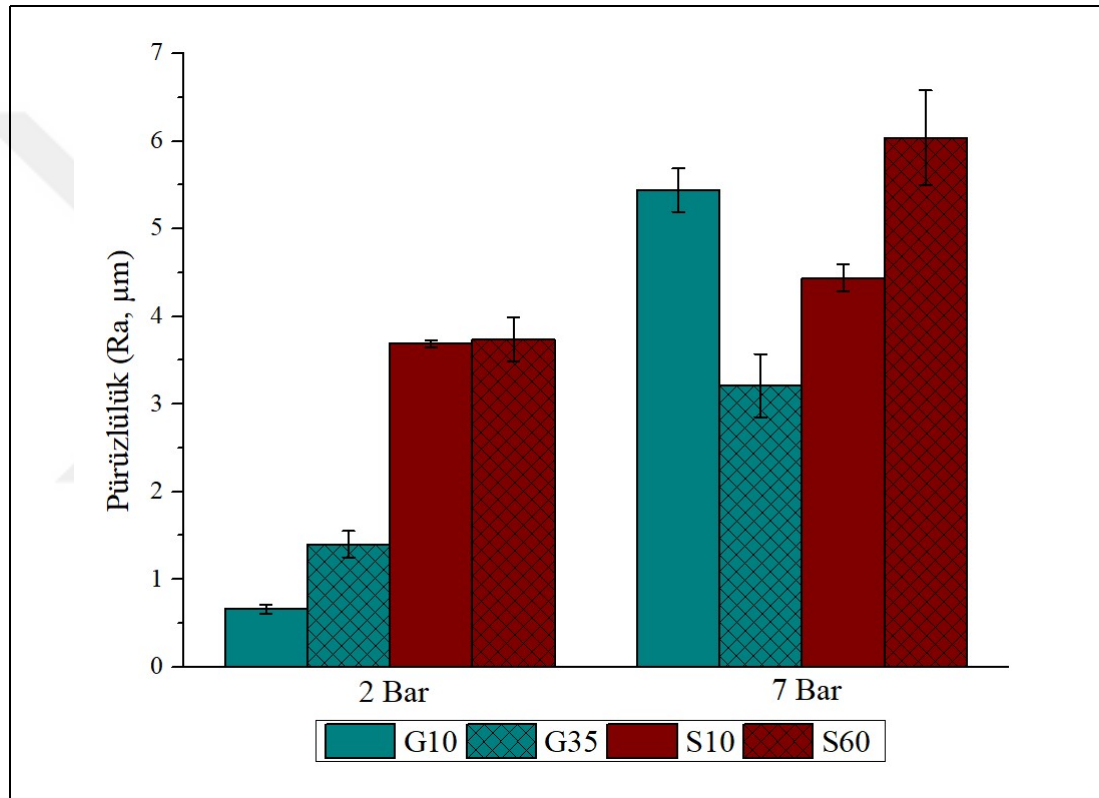
Şekil 5.8. Aşırı bilyalı dövme sonrası yüzeyde poroz yapı oluşumu OM görüntüsü S60 paslanmaz çelik medya, 7 bar püskürtme basıncı, 60 sn dövme süresi, 90° bilya çarpma açısı; a) 200x büyütme, b) 500x büyütme

Bu bölüm kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar özetlendiğinde, her iki medya türünde de bilya boyutu ve bilya püskürtme basıncının AA7075 alaşımının kesit sertliğini arttırdığı görülmüştür. Gerçekleştirilen kesit mikroyapı incelemeler ile kesit sertlik artışının uyumlu olduğu görülmüştür. Kesit sertliğinin bilyalı dövme sırasında malzeme yüzeyinde meydana gelen plastik deformasyonların sonucu olduğu görülmüştür. Öte yandan meydana gelen plastik deformasyonun yüzey morfolojisini de değiştirdiği açıktır. Bu nedenle dövme işleminin AA7075 alaşımının yüzey altı özelliklerine etkisinin yanı sıra yüzey özelliklerine etkisinin incelenmesinin gerekliliği açıktır. Bu kapsamda bir sonraki bölümde bilyalı dövme işlem parametrelerinin AA7075 alaşımının yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi ve kütle gibi yüzey özellikleri incelenmiştir.

## 5.2. Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi

### 5.2.1. Bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi

Yüksek yüzey pürüzlülüğünün yorulma yükü altında çalışan parçalarda kritik çatlak başlangıcı oluşumuna neden olduğu ve bu nedenle yorulma dayanımını düşürdüğü bildirilmiştir [39, 57, 80, 97]. Bu nedenle dövme sonrası metal ve alaşımlarının yüzey pürüzlülük değerinin incelenmesinin bilyalı dövmenin malzeme yüzey özelliklerine etkisinin anlaşılması noktasında önemli olduğu literatürde belirtilmiştir [10, 97].



Şekil 5.9. 2 ve 7 bar püskürtme basınçlarında paslanmaz çelik bilya (S60, S10) ve cam küre (G35, G10) ile bilyalı dövülen numunelerde ortalama çizgisel yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri, sabit dövme süresi (60 sn) ve sabit bilya çarpma açısı (90°)

Bilya türü, bilya boyutu ve püskürtme basıncının farklı dövme sürelerinde yüzey pürüzlülüğüne etkileri Şekil 5.9'da verilmiştir. 2 bar basınçta paslanmaz çelik bilyaların (S60, S10) cam kürelere göre (G35, G10) yüzey pürüzlülüğünü (Ra) önemli ölçüde arttırdığı, ayrıca büyük cam kürelerin (G35) küçük boyutlu cam kürelere (G10) kıyasla yüzey pürüzlülüğüne daha fazla etki ederken, paslanmaz çelik bilyalarda boyutun yüzey pürüzlülüğüne etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu görülmektedir. Düşük basınç değerlerinde, medya türünün yüzey pürüzlülüğüne etki

eden en önemli parametre olduğu görülmektedir. 7 bar basınçta, bilya türü ve bilya boyutu ile yüzey pürüzlülüğü arasında karmaşık bir ilişki olduğu, net bir korelasyonun ortaya konulmadığı görülmektedir. Küçük cam küreler (G10) büyük cam kürelerden (G35) daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne (Ra) neden olurken, büyük paslanmaz çelik bilyalar (S60) küçük paslanmaz çelik bilyalara (S10) kıyasla daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne neden olmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde bilyalı dövme işleminin pek çok parametrenin karmaşık ilişkisine bağlı olarak gerçekleşen bir işlem olduğu söylenebilir. Bu neden ile yüzey pürüzlülüğünün bilya türü, bilya boyutu ve püskürtme basıncı ile olan ilişkisi öncelikle maddeler halinde ele alınarak tartışılmıştır.

Bilyalı dövme işlemi sırasında alaşımın yüzeyine tekrarlı olarak çarpan bilyaların malzeme yüzeyinde neden olduğu plastik deformasyona bağlı olarak yüzey topografyası değişmektedir [57]. Bu nedenle bilya kinetik enerjisine etki eden parametrelerin anlaşılması önemlidir. Kinetik enerji (K.E.) denklemi dikkate alındığında (Denklem 5.1) tepe ve çukurların oluşmasında etken olan bilya çarpma hızının bilya boyutunun ve yoğunluğuna (kütlesi, m) ve bilya püskürtme basıncının (hızı, V) birlikte değerlendirilmesi ile açıklanabileceği görülmektedir.

$$K.E.=(m.V^2)/2 \quad (5.1)$$

Bilya boyutunun artması ile bilya yarıçapının arttığı bu durumun daha derin ve geniş çukurların oluşumuna ve ayrıca artan bilya kütlesinin bilya kinetik enerjisini arttırdığı belirtilmiştir [58, 90]. Öte yandan bilya özkütlesinin medya kinetik enerjisi üzerinde büyük bir etkisi olduğunu belirtilmiştir. Ullah ve ark. [58] çelik ve cam bilyaların çarpma kinetik enerjilerinin araştırılması üzerine yaptıkları çalışmalarında, görece yüksek özkütleli (çelik bilya) medyaların çarpma anındaki kinetik enerjisinin daha yüksek olduğunu ve bununla yüzeyde oluşturduğu darbe basıncını arttırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca yüksek kütleli medyaların yüksek kinetik enerjileri ve momentumlarından dolayı çarpma anında malzeme yüzeyine daha fazla enerji aktarması nedeniyle daha yüksek miktarda plastik deformasyona neden olduklarını bildirmişlerdir. Benedetti ve ark. [39] bilya boyutuna ve türüne bağlı olarak değişen bilya kinetik enerjisinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirleyici olduğunu belirtmiştir. Carvalho ve ark. [10] seramik bilyaların cam bilyalara kıyasla daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne neden olduğunu bu durumun seramik bilyaların cam bilyalara kıyasla

daha yüksek yoğunluğa sahip olması ile alakalı olduğunu bildirmiştir. Ayrıca artan bilya hızının medyaların kinetik enerjisini arttırdığı bu nedenle çarpma anında daha yüksek plastik deformasyona neden oldukları belirtilmiştir [58].

Çalışma sonuçları incelendiğinde, bilyalı dövme sonrası AA7075 alaşımının yüzey pürüzlülüğünün değişimine bilyalı dövme parametrelerinin (bilya türü, bilya boyutu ve püskürtme basıncı) etkisinin tek tek ele alınmaması gerektiği, yüzey özelliklerinin değişiminin bütün operasyon parametrelerinin bir sonucu olarak düşünülmesi gerektiği açıktır [57]. Kikuchi ve ark. [90] sabit basınç altında küçük boyutlu medyaların daha yüksek hızlarda hareket ettiğini belirtmiştir. Büyük boyutlu medyaların basınçlı hava yardımı ile bir miktar hızlandıkları ve hızlarını koruyarak hedef malzeme yüzeyine çarpma kadar bu hızlarını koruduklarını, küçük boyutlu medyaların ise basınçlı hava yardımı ile daha yüksek hızlara çıktıkları ancak basınçlı havanın itici gücünü azalması sonrasında hedef malzeme yüzeyine ulaşana kadar hızlarında ciddi bir düşüş yaşadıklarını bildirmiştir. Öte yandan, Turung ve ark. [98] farklı püskürtme basınç değerlerinde medya boyutuna göre medya hızlarının ve kinetik enerjilerinin değiştiğini buna bağlı olarak da yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin değiştiğini ortaya koymuştur.

Özellikle düşük basınç değerlerinde ve aynı materyel ile gerçekleştirilen dövme işlemlerinde farklı boyutta medyalar ile yakın pürüzlülük değerleri elde ederken basıncın artması ile bilya hızlarının ve kinetik enerjilerinin farklı oranlarda değiştiği ortaya koyulmuştur. Küçük boyutlu medyalarda artan basınç değerleri ile bilya hızlarında yüksek artış olduğu ancak bilya kinetik enerjilerindeki artış miktarının daha az olduğunu sonuç olarak pürüzlülük değerindeki artış miktarının da büyük bilyalara kıyasla az olduğunu, büyük boyutlu medyalarda ise medya hızı artışının düşük olduğu ancak kinetik enerji miktarındaki artışın daha yüksek olduğu buna bağlı olarak yüzey pürüzlülük miktarındaki artışın da yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

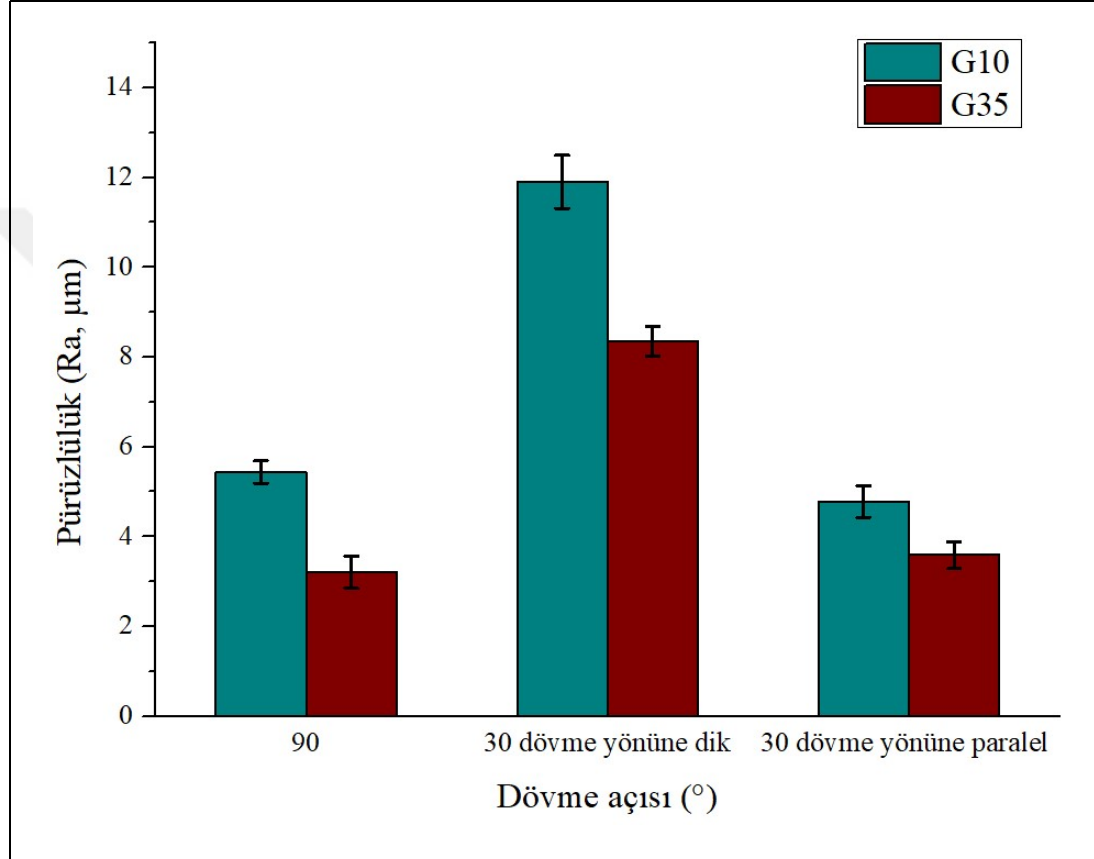
Bu bilgiler ışığında çalışma sonuçları tekrar incelendiğinde düşük basınç değerlerinde (2 bar) aynı materyalden ancak farklı boyuttaki medyaların benzer kinetik enerjilerde olabileceği, çelik bilya ve cam küreler arasındaki yüzey pürüzlülüğü farklılığının ise çelik ( $7,90 \text{ g/cm}^3$ ) ve cam ( $2,45 \text{ g/cm}^3$ ) medyaların özkütlelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek basınç değerlerinde ise çelik bilyalar için büyük boyutlu

bilyaların kinetik enerjilerindeki atış miktarının daha yüksek olduğu bu nedenle yüksek basınç değerlerinde daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne neden olduğu düşünülmektedir.

7 bar basınç altında G35 cam kürenin G10 cam küreden daha düşük yüzey pürüzlülüğüne neden olduğu, bu nedenle yukarıda belirtilen teoriye uymadığı görülmektedir. Öte yandan bilyalı dövme işlem parametrelerinin kesit sertliği ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri birlikte değerlendirildiğine, 2 bar basınçta G10 cam kürelerin S10 çelik bilyalara göre daha düşük yüzey pürüzlülüğüne neden olduğu bu durumun özkütle farkından ve buna bağlı olarak deformasyon miktarındaki değişimden olduğu şu ana kadar ki tartışılan bölümde belirtilmiştir. Bu durumda S10 ile gerçekleştirilen işlemlerde daha yüksek sertlik artışı beklenmesine rağmen yüzey sertlik artış oranlarının her iki medya türü içinde yakın olduğu tespit edilmiştir. Görüldüğü gibi bilyalı dövme işleminin pek çok parametrenin karmaşık ilişkisine bağlı olarak gerçekleştiği açıktır. Dövme işlemleri sırasında önceki bölümlerde detaylı olarak tartışılan mekanizmaların dışında davranışlar görülmüş olabilir. Bu durum cam küre ve çelik bilyaların akış davranışlarındaki farklılıklar, cam kürelerin dövme işlemleri sırasında kırılması gibi pek çok parametrenin sonucu olabilir. Öte yandan sertlik ölçümleri için kullanılan mikrovickers sertlik ölçüm metodunun doğası gereği standart sapma değerlerinin yüksek olabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle malzeme özellikleri - bilyalı dövme işlem parametreleri arasındaki karmaşık ilişkinin açıklanmasında ileri çalışmaların yapılmasının önemli olduğu söylenebilir.

Tez çalışması kapsamında cam küreler ile açılı ( $30^\circ$ ) dövme işlemleri gerçekleştirilerek bilya çarpma açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi de incelenmiştir (Şekil 5.10). Bilya çarpma açısının yüzey pürüzlülüğünü etkilediği, bilya çarpma açısının eğik olduğu durumda ( $30^\circ$ ) dik olduğu duruma ( $90^\circ$ ) göre daha pürüzlü yüzeyler oluşturduğu her iki bilya boyutu (G10 ve G35) için belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün dik çarpma açısında homojen olarak değişim gösterdiği ancak eğik bilya çarpma açısında dövme doğrultusuna bağlı olarak yönlene gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle eğik bilya çarpma açısında gerçekleştirilen işlemlerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi çarpma yönüne dik ve paralel olarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Dövme yönüne paralel ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, dövme yönüne dik olan pürüzlülük değerlerinden daha fazla olduğu hem küçük hem

de büyük çaplı bilyalar için görülmüştür (Şekil 5.10). Dik ve eğik çarpma açılarında (dövme yönüne paralel incelemelerde), büyük boyutlu cam kürelerin (G35), küçük cam kürelere (G10) göre daha pürüzlü bir yüzey oluşturdukları görülmektedir. Küçük cam kürelerin (G10) büyük cam kürelere (G35) göre 30° ile gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemlerinde dövme yönüne dik doğrultuda daha yüksek pürüzlülük değerlerine sebep olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.10. Yüzey pürüzlülüğünün bilyalı dövme açısı ve bilya boyutuna bağlı değişimi, 7 bar püskürtme basıncı, 60 sn dövme süresi, 30° bilya çarpma açısı

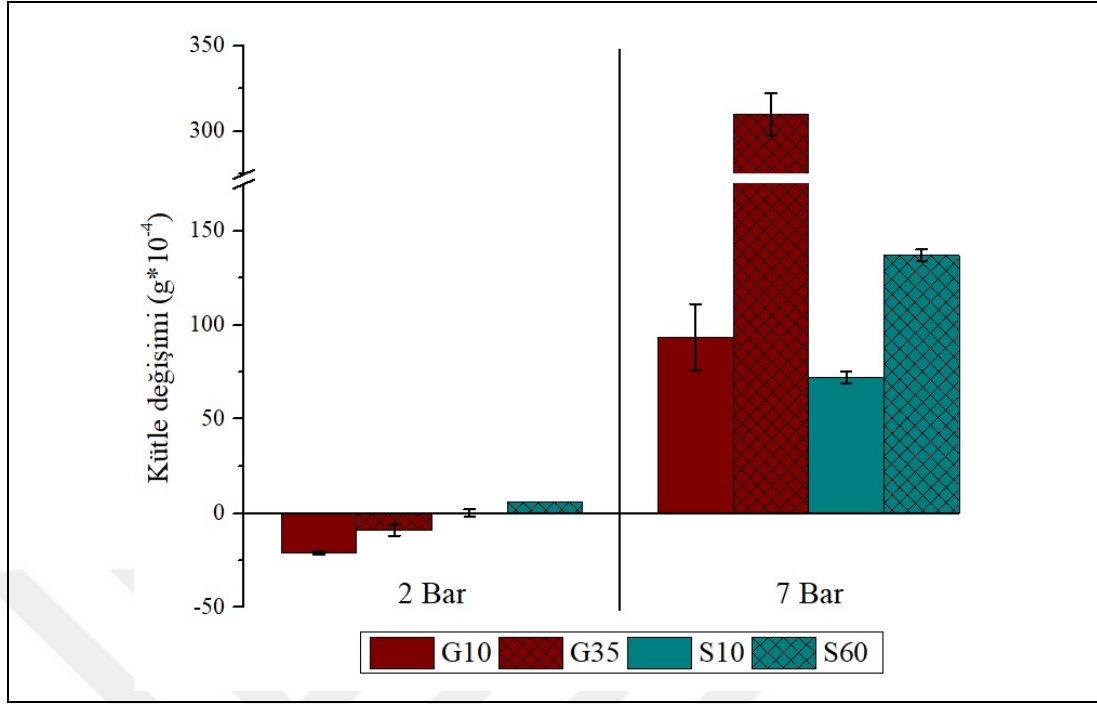
### 5.2.2. Bilyalı dövme sonrası kütle kaybının incelenmesi

Bilyalı dövme işlemlerinde amaç daha önce de belirtildiği gibi küresel morfolojideki medyalarla alaşım yüzeyinin plastik deformasyona uğratılmasıdır [25]. Dövme işlemi sırasında dövme medyalarının talaş kaldırarak yüzeyi aşındırması da görülebilir. Bu aşınmanın temel nedeninin aşırı deformasyona bağlı olarak homojenitesini kaybeden ve lokal olarak yüksek sertlik gösterebilen yüzeyin bilyalı dövme işlemi sırasında kısmi olarak kırılarak yüzeyden uzaklaşması olduğu söylenebilir. Bu bölümde bilyalı dövülen alüminyum alaşımında bu değişimin gözlemlenebilmesi için alaşımın bilyalı



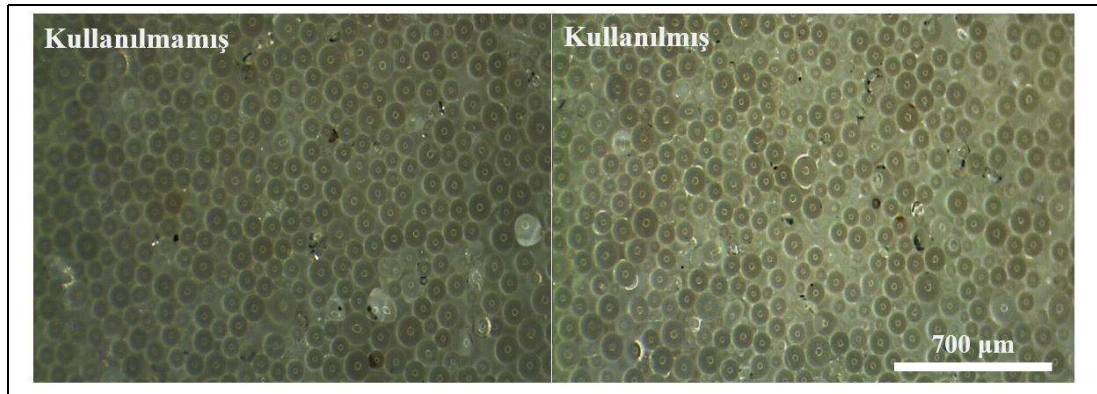
dövmeye ve dövme parametrelerine bağı olarak kütle kayıpları incelenmiştir. Şekil 5.11’de düşük basınç altında (2 bar) gerçekleştirilen dövme işlemlerinde cam kürelerin (G10 ve G35) bir miktar kütle artışına neden olduğu, paslanmaz çelik bilyaların ise (S10 ve S60) bir miktar kütle kaybına neden olduğu görülmektedir. 2 bar basınçta dövme medyalarının malzeme yüzeyine gömüldüğü düşünülmektedir (Şekil 5.20’da detaylı olarak tartışılmıştır). Artan püskürtme basıncı (7 bar) ile tüm medya türleri ile gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemlerinde yüzeyde kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. Bu durum önceki bölümlerde tartışıldığı üzere artan basınç miktarına bağı olarak tüm medya tür ve boyutlarında malzeme yüzeyinin düşük basınçta gerçekleştirilen dövme işlemlerine göre daha yüksek miktarda plastik deforme olmasına bağı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Yüksek basınçta gerçekleştirilen bilyalı dövme nedeniyle oluşan aşırı deformasyon bu paragraf içerisinde kısaca açıklandığı gibi malzemenin yüzeyinde süreksizliklere neden olmakta ve bilyaların darbesel etkilerine bağı olarak yüzeyden malzeme uzaklaşması için uygun bir ortam oluşturmaktadır. S10 ve G10 gibi küçük boyutlu medyaların görece daha az kütle kaybına neden olduğu, S60’ ın küçük boyutlu medyalara kıyasla bir miktar daha yüksek kütle kaybına neden olduğu görülmektedir ancak G35 kodlu medyaların diğer medyalarla kıyasla malzeme yüzeyinde daha yüksek kütle kaybına neden olduğu görülmektedir. Bu durumun yüksek basınç altında bilya ve kürelerin daha yüksek kinetik enerjiye sahip olmaları ve medyaların mekanik özellikleriyle ilgili olduğu düşünülmektedir. Özellikle cam kürelerin boyutlarının büyümesiyle yüksek hızlarda daha kırılğan bir yapıya ulaştıkları ve malzeme yüzeyine çarpan bilyaların kırılma sonrası aşındırıcı karakter kazandırarak yüksek kütle kaybına neden oldukları düşünülmektedir. Bu neden ile bilyalı dövme ile bilya medyalarında meydana gelen değişimlerin araştırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Medya türlerinin (çelik bilya ve cam küre) sahip oldukları farklı mekanik özellikler (muvakavemet, sertlik, kırılma tokluğu vb.) nedeni ile bilyalı dövme işlemi sırasında gösterdikleri davranışlar ve bu medya türlerinin AA7075 alaşımının bilyalı dövmeye bağı değişen yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkileri değişim göstermektedir. Bu nedenle bilyalı dövme öncesi ve sonrası kullanılan sarf malzemelerinin incelenmesi önem taşımaktadır.

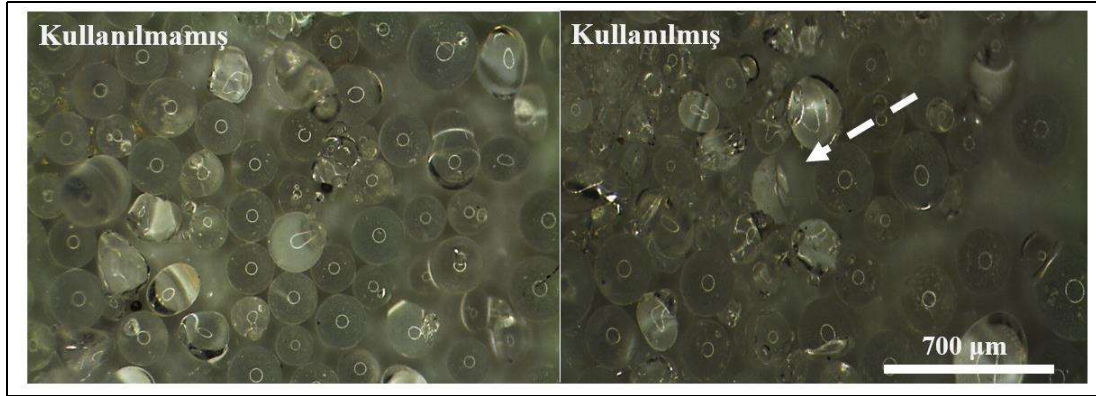


Şekil 5.11. 2 ve 7 bar püskürtme basınçlarında paslanmaz çelik bilya (S60) ve cam küre (G35) ile bilyalı dövülen numunelerde kütle değişimi grafiği, sabit dövme süresi (60 sn) ve sabit bilya çarpma açısı (90°)

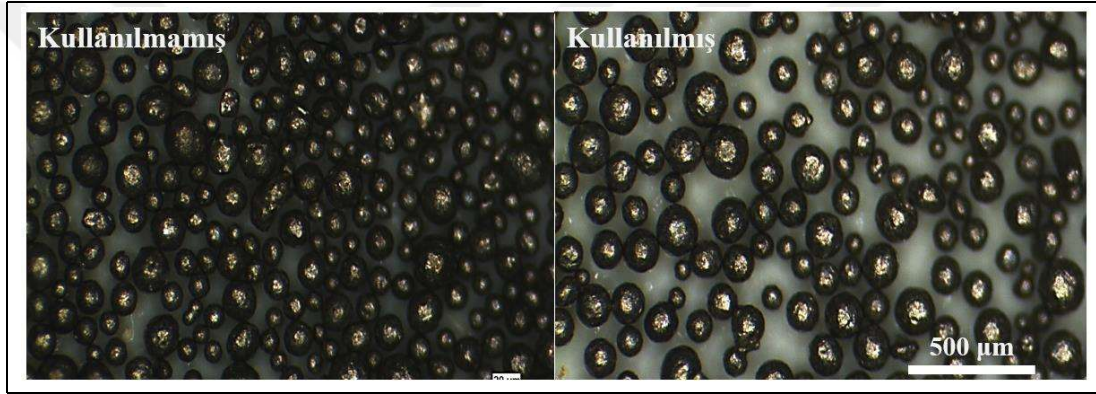
Gerçekleştirilen dövme işlemleri sonrası medyalara ait görüntüler incelendiğinde (Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15) tüm medyaların dövme işlemleri öncesi küresel şekilli, kırıksız, deforme olmamış, homojen boyut dağılım aralığında ve aralarında ihmal edilebilecek miktarlarda imalata bağlı hatalı partiküllerin olduğu görülmektedir. Kullanılan medya görüntüleri incelendiğinde, S10 ve S60 kodlu çelik bilyaların ve G10 ve kodlu cam kürelerin (Şekil 5.12, Şekil 5.14, Şekil 5.15) şekil özelliklerini koruduğu görülmektedir.



Şekil 5.12. G10 cam kürelerin bilyalı dövme öncesi ve sonrası stereo mikroskop görüntüleri (4x büyütme), a) dövme öncesi (kullanılmamış), b) dövme sonrası (dövme işlemlerinde kullanılmış)



Şekil 5.13. G35 cam kürelerin bilyalı dövme öncesi ve sonrası stereo mikroskop görüntüleri (3x büyütme), a) dövme öncesi (kullanılmamış), b) dövme sonrası (dövme işlemlerinde kullanılmış)



Şekil 5.14. S10 cam kürelerin bilyalı dövme öncesi ve sonrası stereo mikroskop görüntüleri (4x büyütme), a) dövme öncesi (kullanılmamış), b) dövme sonrası (dövme işlemlerinde kullanılmış)



Şekil 5.15. S60 cam kürelerin bilyalı dövme öncesi ve sonrası stereo mikroskop görüntüleri (1x büyütme), a) dövme öncesi (kullanılmamış), b) dövme sonrası (dövme işlemlerinde kullanılmış)

Segurado ve ark. [82] medya yüzey geometrisinin önemli olduğunu, yüksek yüzey kalitesine sahip medyaların daha az hasar verdiğini ve daha az pürüzlülüğüne neden

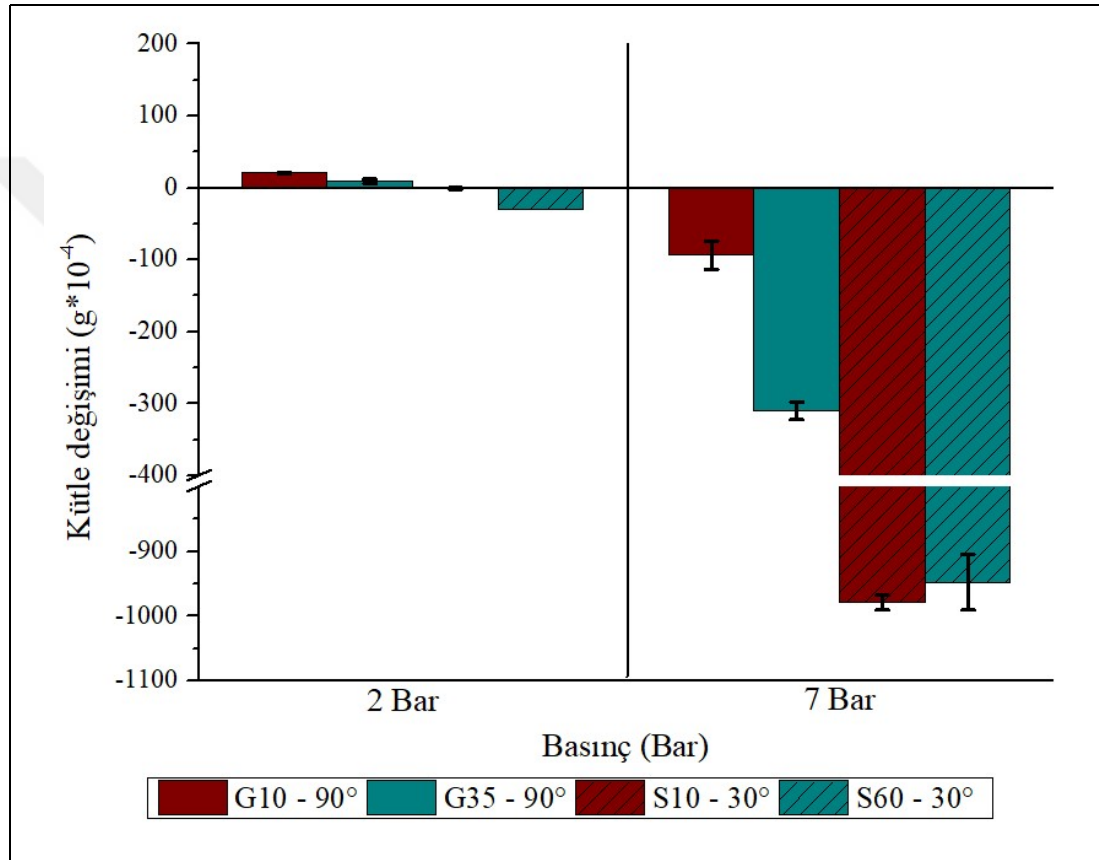
olduğunu söylemiştir. G35 cam kürelerin bir miktarının ise dövme işlemleri sırasında kırıldığı görülmektedir (Şekil 5.13). Bilyalı dövme işlemleri sırasında gevrek yapılı cam kürelerin hedef malzeme yüzeyine çarpmaları sonucu kırıldıkları düşünülmektedir. Bu durum medyaların sahip oldukları kinetik enerjinin bir kısmının kırılmaya harcanmasına neden olmaktadır. Bu durum G35 kodlu medya ile 7 barda gerçekleştirilen dövme işlemleri sonrası görülen düşük yüzey pürüzlülüğünün sebebi olabilir. Küçük boyutlu cam kürelerin dövme işlemleri sırasında büyük cam kürelere oranla çok daha düşük oranlarda kırılmış olmaları dikkat çeken önemli bir noktadır. Bu durum ise yüzey alanı/hacim ilişkisi ile açıklanabilir. Cam kırılğan yapılı bir malzeme olmasına rağmen yüzey alanı/hacim oranı değerinin büyümesi ile daha tok davranış sergilemektedir. Bu nedenle cam kürelerin kırılma davranışının bilya çarpma hızı ve yüzey alanı/hacim ilişkisine bağlı olarak değişim gösterdiği düşünülmektedir. Gerçekleştirilen test çalışmaları kapsamında düşük bilya püskürtme hızlarında (2 bar) cam kürelerde kırılma oranı düşük iken yüksek püskürtme hızlarında (7 bar) büyük boyutlu cam kürelerin (G35) sahip oldukları düşük yüzey alanı/hacim oranı nedeniyle küçük boyutlu cam kürelere (G10) kıyasla daha yüksek kırılma davranışı sergiledikleri düşünülmektedir.

Bilyaların alaşımın yüzeyinde meydana getirdiği aşınma türü “katı partikül erozyonu olarak” tanımlanabilir. Bir sonraki bölümde tartışılan bilyalı dövme sonrası yüzey morfolojisinin değişimi de bu durumu işaret etmektedir. Her ne kadar tez çalışmasının direkt amacı bilyalı dövme esnasında yüzeyde oluşan aşınma hasarının belirlenmesi olmasa da aşınmanın yüzey özelliklerini etkileyen önemli bir süreç olduğu göz önünde bulundurularak bu konunun biraz daha irdelenmesi düşünülmüştür. Bu amaç ile bu bölümün devamında metallerin katı partikül erozyonu davranışında etkin aşınma mekanizmalarını değiştiren en önemli parametre olan aşındırıcı çarpma açısının etkilerinin anlaşılması amacıyla farklı bilya çarpma açılarında bilyalı dövme işlemleri gerçekleştirilmiş ve bilya çarpma açısına bağlı olarak kütle kaybındaki değişim incelenmiştir (Şekil 5.16). Bu kapsamda her iki cam küre boyutu için metallerde katı partikül erozyonu davranışını doğrudan değiştiren 30° ve 90° partikül çarpma açılarında da gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri incelenmiştir.

Kütle kaybının bilya boyutundan bağımsız olarak bilya çarpma açısıyla doğrudan ilişkili olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 5.16). Eğik çarpma açısıyla gerçekleştirilen



dövme işlemlerinde her iki bilya boyutunda da belirgin kütle kaybı gözlemlenirken, dik çarpma açısı ile dövülen numunelerde kütle kaybının bilya boyutuna bağlı olarak değişim gösterdiği görülmüştür. Dik açı ile dövülen numunelerde, küçük bilyalar kütle kaybına sebep olurken, büyük bilyalarla dövülen numunelerde 7 barda kütle artışı gözlemlenmiştir. Kütle artışının sebebi, camın gevrek bir malzeme olması ve cam bilyaların boyutları arttıkça daha kırılğan bir yapı sergilemeleri, bunun sonucunda ise yüzeye gömülmeleri şeklinde yorumlanabilir (Şekil 5.20).



Şekil 5.16. Farklı dövme açılarında G10 ve G35 cam küre ile bilyalı dövülen numunelerde kütle değişimi grafiği, bilya püskürtme basıncı (2 ve 7 bar), sabit dövme süresi (60 sn) ve sabit bilya çarpma açısı (90°)

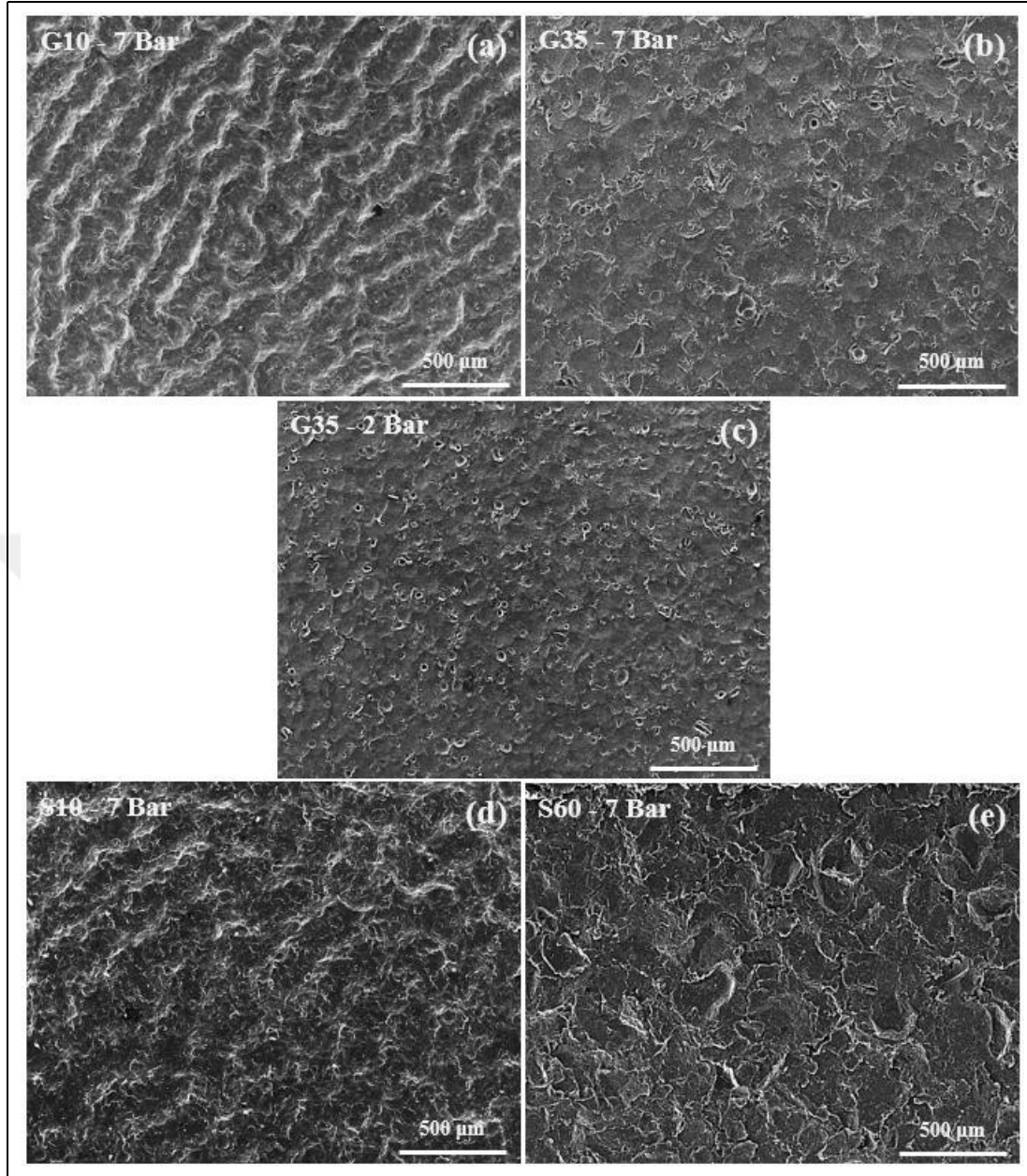
Gariépy ve ark. [33] bilyaların yüzeye dik açı ile püskürtüldüğü durumlarda kırıldıklarını ve arkalarından gelen diğer bilyalarla beraber yüzeye tekrar çarparak yüzeye gömüldüklerini belirtmişlerdir ancak püskürtme basıncının artması ile mekanizmanın değiştiği ve cam kürelerin aşındırıcı karakter gösterdikleri düşünülmektedir. Avcu ve ark. [99] Ti6Al4V alaşımı ile yaptıkları çalışmalarda farklı çarpma açıları ve farklı hızlar ile yüzeye püskürtülen aşındırıcı partiküllerin yüzeyde meydana getirdiği aşınma miktarını araştırmışlardır. Çalışmalarında sünek davranış

gösteren malzemelerde eğik (30°) çarpma açısı ile yüzeye çarpan partiküllerin yüzeye dik çarpan (90°) partiküllere göre daha aşındırıcı davranış gösterdiğini ortaya çıkarmışlardır. Bu sonuçlar cam bilyalar ile yapılan bilyalı dövme işleminde ortaya çıkan kütle kaybı sonuçlarıyla örtüşmektedir.

### 5.2.3. Bilyalı dövme sonrası yüzey morfolojisinin incelenmesi

Bilyalı dövme işlemi sonrası artan yüzey pürüzlülüğü ve deforme olan malzeme yüzeyi bilyalı işleminin kaçınılmaz bir sonucudur. Bilyalı dövme sonrası malzeme yüzeyinde meydana gelen kusur miktarının artan yüzey pürüzlülüğü ile arttığı literatürde bildirilmiştir [39, 57, 80, 97]. Bilyalı dövme sonrası yüzey özelliklerinin değişiminin malzeme performansına etkisinde yüzey pürüzlülüğünü tek başına dikkate alınmamalı ayrıca malzeme yüzeyinde oluşan yüzey kusurları incelenmelidir [100]. Yorulma yükü altında çalışan malzemelerde yüzey kusurları kritik çatlak başlangıç noktalarının oluşmasına neden olabileceği [81] gibi aşınma yükü altında çalışan malzemelerde deformasyon mekanizmalarına bağlı olarak malzeme aşınma davranışı ve sürtünme katsayısı değişebilmektedir [101]. Bu bölümde önceki bölümlerde tartışılan bilyalı dövme işlem parametrelerine bağlı değişen yüzey pürüzlülüğü özelliklerinin ve kütle kaybının kök nedenlerinin araştırılması amacı ile gerçekleştirilen taramalı elektron mikroskobu çalışmaları incelenmiştir.

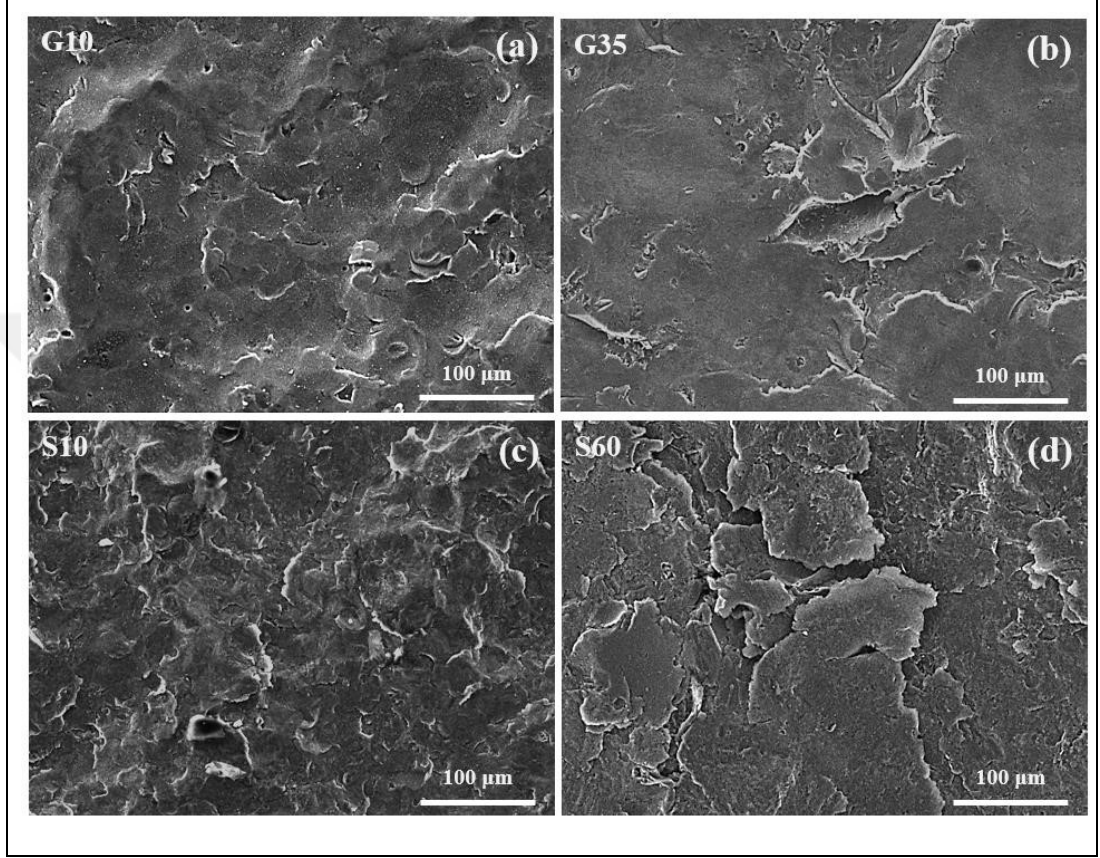
Şekil 5.17’de dövme parametrelerinin yüzey topografyasına etkisi incelenmiştir. İkincil elektron (SE) modunda incelenen yüzeylerde beyaz kontrastlı parlak bölgeler tepe noktaları ifade ederken koyu kontrastlı alanlar ise çukur bölgeleri göstermektedir. G10 ve S10 medyaların alaşımın yüzey topografyasını benzer şekilde ve daha homojen modifiye ettiği, yüzeyde dar tepe ve çukurların olduğu görülmektedir (Şekil 5.17). Artan medya boyutları ile yüzeyde daha geniş tabanlı tepe ve çukur oluşumlarının meydana geldiği görülmektedir. Bu durum artan bilya çapına bağlı olarak darbeye maruz kalan alanın genişlemesi ile açıklanabilir [98]. Püskürtme basıncının artması ile yüzey pürüzlülüğünün tüm dövme işlemlerinde arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.9). Artan basıncın bilyaların sahip olduğu kinetik enerjiyi ve buna bağlı olarak oluşan kriter boyut ve derinliklerini arttırdığı açıktır (Şekil 5.17-b ve -c). Artan basınç artışı ile birlikte malzeme yüzeyinde daha derin ve keskin köşeli tepe ve çukurların olduğu görülmektedir.



Şekil 5.17. Farklı boyutlu paslanmaz çelik bilya (S10 ve S60) ve cam küre (G10 ve G35) ile bilyalı dövülen numunelerin yüzey topografyalarının SEM (x100, Mod:SE) görüntüleri, sabit dövme süresi (60 sn), bilya çarpma açısı (90°) a) G10 cam küre – 7 bar, b) G35 cam küre 7 bar, c) G35 cam küre 2 bar, d) S10 paslanmaz çelik bilya - 7 bar, e) S60 paslanmaz çelik bilya - 7 bar

Bu kapsamda büyük boyutlu medyaların daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne neden olacağı düşünülebilir ancak yüzey pürüzlülük sonuçları incelendiğinde yüzey morfolojisi ve pürüzlük arasında doğrudan bir ilişki görülmediği, yüzey pürüzlüğünün bilyalı dövme işleminin karmaşık yapısına bağlı olarak değişim gösterdiği söylenebilir. Ayrıca G35 ve dövülen AA7075 alaşımının yüzeylerinin daha homojen olmayan bir yapıda oldukları, özellikle S60 ile dövülen malzeme yüzeyinde aşırı

plastik deformasyon izleri görülmektedir (Şekil 5.17-d). Kesit sertlik grafikleri (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2) ayrıca kesit mikroyapıları (Şekil 5.4) incelendiğinde boyutun ve basıncın artması ile sertliğin arttığı ve en yüksek sertik değeri S60, 7 barda dövülen numunede görülmüştür.

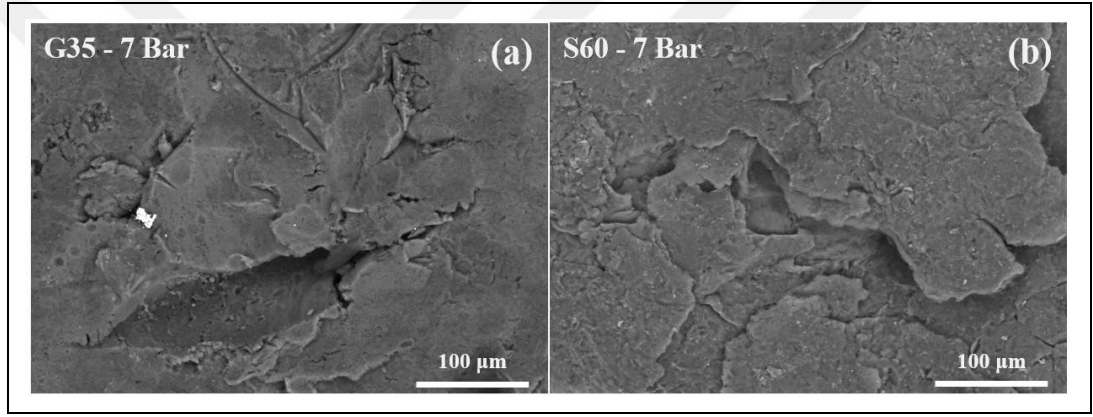


Şekil 5.18. Farklı boyutlu paslanmaz çelik bilya (S10 ve S60) ve cam küre (G10 ve G35) ile bilyalı dövülen numunelerde meydana gelen deformasyon mekanizmalarının SEM (x500, Mod:SE) görüntüleri, sabit dövme süresi (60 sn), püskürtme basıncı (7 bar) ve bilya çarpma açısı (90°) a) G10 cam küre, b) G35 cam küre, c) S10 paslanmaz çelik bilya, d) S60 paslanmaz çelik bilya

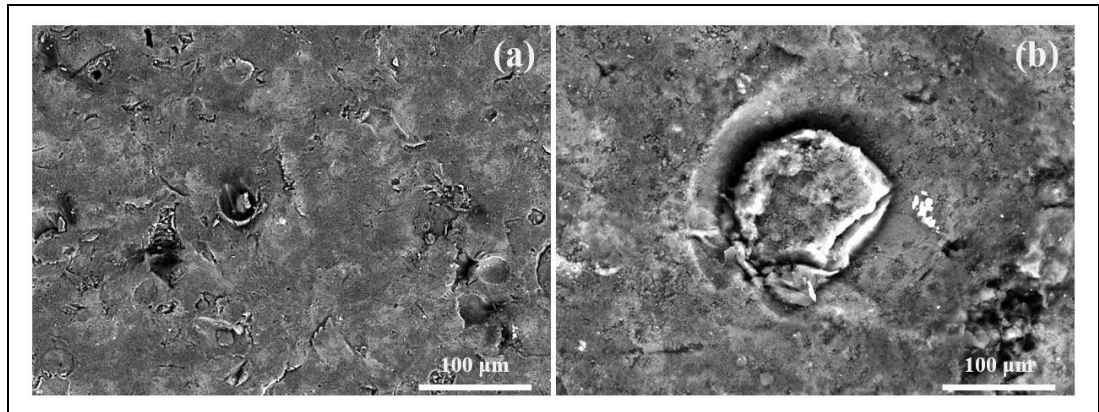
Yüksek basınç altında tüm medya boyutu ve türlerinde kütle kaybı yaşandığı ancak G35 ile dövülen malzemelerde bu değer dikkat çekici oranda olduğu görülmüştür. Şekil 5.18-a, -c ve -d’de malzeme yüzeylerinde dövmeyle ilgili plastik deformasyon olduğu ve deformasyona bağlı malzeme yüzeyinden kopan talaşlar olduğu görülmekte iken Şekil 5.18-b’de yüzeyde görülen plastik deformasyonların yanı sıra kesme izlerinin de oluştuğu görülmektedir. Tespit edilen mikro kesme mekanizmalarının yüksek oranda kütle kaybına neden olduğu söylenebilir. Bu durumun nedeninin önceki bölümde incelenen, büyük boyutlu cam kürelerin yüksek basınç altında kırılması ve



aşındırıcı karakter kazanması olduğu düşünülmektedir (Şekil 5.13). Büyük boyutlu çelik bilyaların küçük çelik bilyalar ve küçük cam kürelere oranla daha büyük plastik deformasyonlara neden olduğu (Şekil 5.18), bu durumun daha yüksek kütle kaybına neden olduğu düşünülmektedir. Literatürde AA7075 malzemesi gibi görece yumuşak bir malzemenin çelik gibi yüksek deformasyon kabiliyeti olan medyaların malzemeyi olumsuz etkileyebileceği belirtilmiştir [81]. Bu nedenle S60 ile dövülen malzeme yüzeylerinde görülen bilyalı dövme sonrası kusur miktarı kritiktir. Yapılan çalışmalar sonucunda medya türü ve boyutuna bağlı olarak kütle kaybına neden olan iki mekanizma; mikro kesme (Şekil 5.19-a) ve plastik deformasyon (Şekil 5.19-b) mekanizmaları olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.19. Cam küre ve paslanmaz çelik bilyalarda görülen temel deformasyon mekanizmalarının SEM görüntüleri (x1k, Mod: BSE), sabit dövme süresi (60 sn), püskürtme basıncı (7 bar) ve bilya çarpma açısı (90°) a) G35 cam küre, b) S60 paslanmaz çelik bilya



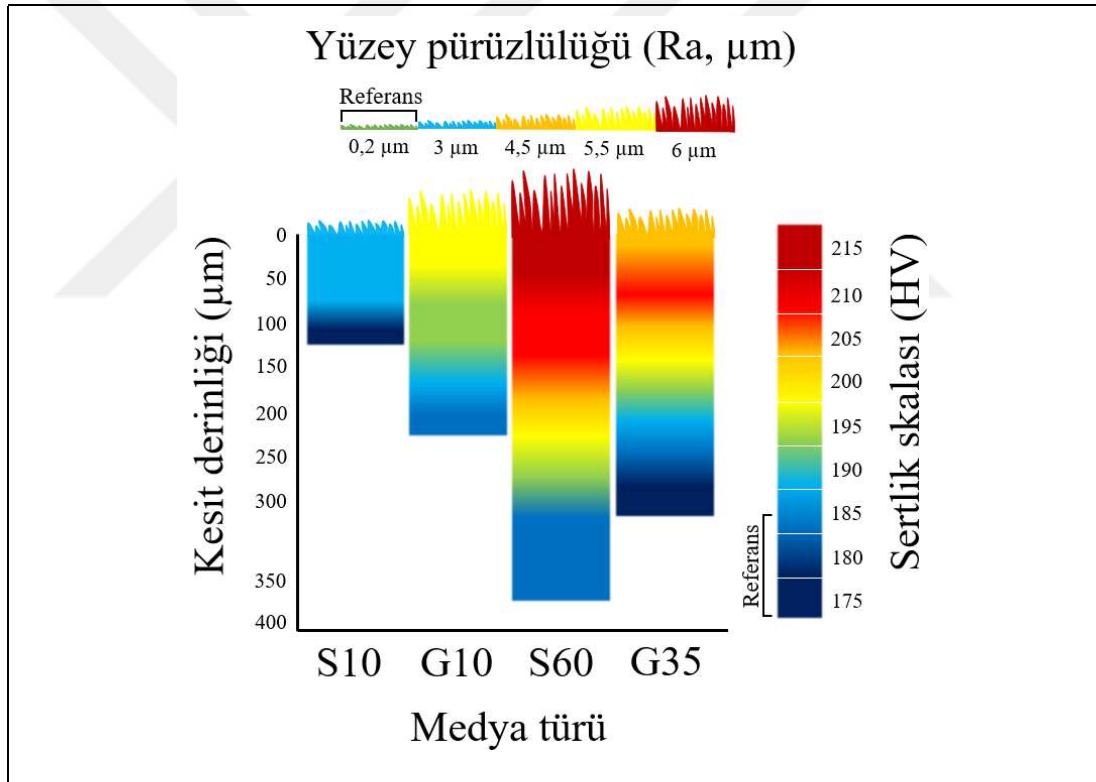
Şekil 5.20. Bilyalı dövme sonrası AA7075 malzeme yüzeyine gömülen cam parçalarının SEM (Mod:SE) görüntüleri, G35 cam küre sabit dövme süresi (60 sn), püskürtme basıncı (2 bar) ve bilya çarpma açısı (90°) a) x500 büyütme, b) x2,5k büyütme

2 bar basınçta paslanmaz çelik bilyalar (S10, S60) ihmal edilebilir miktarda kütle kaybına neden olurken cam kürelerin (G10, G35) bir miktar kütle artışına sebep olduğu, basıncın artması ile kütle kaybının meydana geldiği görülmüştür (Şekil 5.11). Bu durumun dövme sırasında kırılarak keskin köşeli hale gelen cam kürelerin malzeme yüzeyine gömülmesi nedeniyle gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 5.20). Basıncın artması ile enerjileri artan bu partiküllerin malzeme yüzeyine gömülme yerine aşındırıcı davranış kazandıkları ve kütle kaybına neden oldukları düşünülmektedir (Şekil 5.19-a).



## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, AA7075-T6 alaşımına farklı bilya türü, bilya boyutu ve bilya püskürtme basıncı parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi, kütle kaybı gibi yüzey özelliklerine ve kesit sertliği, kesit mikroyapısı gibi yüzey altı özelliklerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmış ve kök nedenleri tartışılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. AA7075 alaşımının bilyalı dövme işlemleri sonrası kesit sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve kütle kaybı davranışları Şekil 6.1’ de şematik olarak özetlenmiştir.



Şekil 6.1. Bilyalı dövme sonrası medya türüne bağlı AA7075 alaşımının kesit sertliği ve yüzey pürüzlülüğü değişimi şematik gösterimi, 7 bar püskürtme basıncı, 60 sn dövme süresi 90° bilya çarpma açısı

Her iki medya türünde de bilya boyutu ve bilya püskürtme basıncının yüzey altı sertlik derinliğini etkilediği, paslanmaz çelik bilyaların daha yüksek sertlik artışı sağladığı tespit edilmiştir (Şekil 6.1). Sertlik artışının bilyalı dövme işlemleri sonrasında yüzey altında aşırı plastik deformasyon bölgeleri (APD) oluşumuna bağlı gerçekleştiği, APD

derinliğinin dövme işlem parametrelerine bağlı değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Bilya boyutunun ve püskürtme basıncının APD derinliğine her iki medya türünde de etki ettiği belirlenmiştir.

Bilya boyutunun ve püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğüne her iki medya türünde de etki ettiği belirlenmiştir (Şekil 6.1). Düşük basınç değerlerinde cam kürelerin daha düşük yüzey pürüzlülüğüne neden olduğu ancak G10 cam kürelerin basınç artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünü dramatik olarak arttırdığı görülmüştür.

Bilyalı dövme işlemleri sırasında alaşımın yüzey ve yakın yüzey altı bölgesinde dövme kusurları meydana geldiği gerçekleştirilen kesit yüzey ve yüzey altı mikroyapısal karakterizasyon çalışmalarında ortaya konmuştur. En şiddetli yüzey deformasyonunun S60 kodlu bilya ile 7 barda gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri sonucu meydana geldiği görülmüştür (yüksek pürüzlülük ve yüksek kesit sertliği artışı) (Şekil 6.1). Cam kürelerde daha az yüzey hasarı meydana geldiği tespit edilmiş, yer yer yüzeyde kesme izlerine rastlanmıştır. Çelik medyalarda ise aşırı deformasyon, katlanma kulak oluşumu gibi deformasyon mekanizmalarının yoğun olduğu görülmüştür.

Püskürtme basıncının artması ile kütle kaybı miktarının arttığı belirlenmiştir. 2 barda tüm bilya türü ve boyutlarında benzer kütle kaybı değerleri görüldüğü, 7 barda G10, S10 ve S60' ın alaşımın yüzeyinde görece yakın miktarlarda kütle kaybına neden olduğu G35 kodlu medyaların ise yüksek kütle kaybına neden olduğu görülmüştür. Kütle kaybının çarpan bilyaların etkisiyle oluşan kesme, gevreklemeye bağlı kopan plastik deforme olmuş parçalar ile alakalı olduğu düşünülmektedir.

Tez çalışması kapsamında farklı medya türlerinin AA7075 alüminyum alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkisi derinlemesine ortaya konulmuştur. Bilyalı dövme işlemi sonucu AA7075 alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerinin değişiminde doğrudan bir korelasyon olmadığı, farklı bilyalı dövme parametrelerinin yüzey ve yüzey altı özelliklerinin değişiminde farklı etkileri olduğu görülmüştür. Ayrıca dövme parametrelerinin farklı kombinasyonları ile farklı malzeme özelliklerinin benzer oranda geliştirilebileceği belirlenmiştir. Örneğin G35 - 7 bar ve S60 - 2 bar ile gerçekleştirilen dövme işlemlerinde benzer sertlik trendi ve pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Bu durumun medya yüzeyi morfolojisi, medya çarpma

kinetik enerjisi ile çarpma kinetik enerjisini etkileyen bilya kütlesi ve medya hızı ile alakalı olduğu söylenebilir.

Büyük boyutlu cam kürelerin (G35) düşük yüzey pürüzlülüğüne neden olduğu ve sertlik artışı sağladığı belirlenmiştir (Şekil 6.1). Bu neden ile cam kürelerin AA7075 alaşımının yorulma uygulamaları için istenen düşük yüzey pürüzlüğü ve yüksek kesit sertliği değerlerinin elde edilmesinde paslanmaz çelik bilyalara karşı iyi bir endüstriyel alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır. Ancak cam kürelerin dövme işlemleri sırasında operasyon parametrelerine bağlı olarak paslanmaz çelik bilyalara kıyas ile daha kolay kırılabilirdiği ve bu neden ile yer yer malzeme yüzeyinde mikro kesmeye sebep oldukları tespit edilmiştir. Bu noktada cam kürelerin bilyalı dövme işlemleri sırasındaki kırılma davranışlarının derinlemesine anlaşılmasının AA7075 alaşımının bilyalı dövme performansının geliştirilmesi için önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Ek olarak, otomotiv sektöründe çelik dişli parçaları ve biyomedikal sektörde titanyum implant malzemeleri gibi yüzey toleransının önemli olduğu ve yüksek yorulma yükü altında çalışan farklı metal ve alaşımlarının bilyalı dövülmesinde cam kürelerin kullanılabilirliğinin incelenmesi önemli bir araştırma konusu olarak düşünülmektedir.

Yukarıda özetlenen ve tez çalışması kapsamında ortaya konan teorilerin ve soruların araştırılmasının literatürde konuyla ilgili boşluğun giderilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu kapsamda bu tez çalışmasının devamı olarak; (i) EBSD haritalama tekniklerinin kullanılarak yüzey altı mikroyapısının medya türüne göre değişimin derinlemesine anlaşılması, (ii) konfokal mikroskobu ve temassız uçlu optik profile yöntemleri ile yüzey topografyası ve morfolojisinin incelenmesinin ayrıca yüzey deformasyon mekanizmaları ve dövme parametreleri arasındaki ilişkinin irdelenmesi, (iii) SEM-EDX haritalama yöntemi ile dövme sırasında kırılarak malzeme yüzeyine gömüldüğü tespit edilen cam kürelerin istatistiksel olarak hesaplanması, (iv) basma testleri ile bilyaların mekanik özelliklerinin ortaya konması ve bilya püskürtme hızı, bilya debisi gibi ileri bilyalı dövme parametrelerinin incelenmesi çalışmalarının bilyalı dövme operasyon parametreleri ve malzeme özellikleri arasındaki ilişkinin derinlemesine anlaşılması çalışmalarının gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] Lin Y. C., Jiang Y.-Q., Chen X.-M., Wen D.-X., Zhou H.-M., Effect of Creep-Aging on Precipitates of 7075 Aluminum Alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2013, **588**, 347-356.
- [2] Paturi U. M. R., Narala S. K. R., Pundir R. S., Constitutive Flow Stress Formulation, Model Validation and Fe Cutting Simulation for Aa7075-T6 Aluminum Alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2014, **605**, 176-185.
- [3] Mishra B., Mondal C., Goyal R., Ghosal P., Kumar K. S., Madhu V., Plastic Flow Behavior of 7017 and 7055 Aluminum Alloys under Different High Strain Rate Test Methods, *Materials Science and Engineering: A*, 2014, **612**, 343-353.
- [4] Huo W., Hou L., Cui H., Zhuang L., Zhang J., Fine-Grained Aa 7075 Processed by Different Thermo-Mechanical Processings, *Materials Science and Engineering: A*, 2014, **618**, 244-253.
- [5] Taheri-Mandarjani M., Zarei-Hanzaki A., Abedi H. R., Hot Ductility Behavior of an Extruded 7075 Aluminum Alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2015, **637**, 107-122.
- [6] Ardelean M., Lascău S., Ardelean E., Josan A., Surface Treatments for Aluminium Alloys, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, **294**(1), 012042.
- [7] Elkandari B., Excimer Laser Surface Melting Treatment on 7075-T6aluminium Alloy for Improved Corrosion Resistance, PhD Thesis, The University of Manchester, the Faculty of Engineering and Physical Sciences, Manchester, 2013.
- [8] Ashjari M., Jodeiri Feizi A., 7xxx Aluminum Alloys; Strengthening Mechanisms and Heat Treatment: A Review, *Material Science & Engineering International Journal*, 2018, **2**(2), 52-56.
- [9] Djukanovic G., Aluminium-Lithium Alloys Fight Back, <https://aluminiuminsider.com/aluminium-lithium-alloys-fight-back/>, (Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2020).
- [10] Carvalho A. L. M., Voorwald H. J. C., Influence of Shot Peening and Hard Chromium Electroplating on the Fatigue Strength of 7050-T7451 Aluminum Alloy, *International Journal of Fatigue*, 2007, **29**(7), 1282-1291.

- [11] Jin Y., Cai P., Wen W., Nagaumi H., Xu B., Zhang Y., Zhai T., The Anisotropy of Fatigue Crack Nucleation in an Aa7075 T651 Al Alloy Plate, *Materials Science and Engineering: A*, 2015, **622**, 7-15.
- [12] Hu B., Richardson I. M., Microstructure and Mechanical Properties of Aa7075(T6) Hybrid Laser/Gma Welds, *Materials Science and Engineering: A*, 2007, **459**(1-2), 94-100.
- [13] Bahrami M., Farahmand Nikoo M., Besharati Givi M. K., Microstructural and Mechanical Behaviors of Nano-Sic-Reinforced Aa7075-O Fsw Joints Prepared through Two Passes, *Materials Science and Engineering: A*, 2015, **626**, 220-228.
- [14] Bayazid S., Farhangi H., Asgharzadeh H., Radan L., Ghahramani A., Mirhaji A., Effect of Cyclic Solution Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 7075 Al Alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2016, **649**, 293-300.
- [15] Kaufman, Gilbert J., *Properties of Aluminum Alloys: Fatigue Data and the Effects of Temperature, Product Form, and Processing*, 1st ed., ASM International, Ohio, 2008.
- [16] Liu Q., An Effective Life Extension Technology for 7xxx Series Aluminium Alloys by Laser Shock Peening, *Defence Science and Technology Organisation*, DSTO-TR-2177, 2008.
- [17] Kumar D., Idapalapati S., Wang W., Narasimalu S., Effect of Surface Mechanical Treatments on the Microstructure-Property-Performance of Engineering Alloys, *Materials (Basel)*, 2019, **12**(16).
- [18] Gupta R. K., Murty B. S., Birbilis N., *An Overview of High-Energy Ball Milled Nanocrystalline Aluminum Alloys*, Springer, Berlin, 2017.
- [19] Soyama H., Surface Mechanics Design of Metallic Materials on Mechanical Surface Treatments, *Mechanical Engineering Reviews*, 2015, **2**(1), 1-20.
- [20] Nam Y.-S., Jeong Y.-I., Shin B.-C., Byun J.-H., Enhancing Surface Layer Properties of an Aircraft Aluminum Alloy by Shot Peening Using Response Surface Methodology, *Materials & Design*, 2015, **83**, 566-576.
- [21] Igor A., Alternative mechanical surface treatments: microstructures, residual stresses & fatigue behavior, Editörler: Wagner Lothar, *Shot Peening*, Wiley, 421-434, 2003.
- [22] Odhiambo D., Cavitation Shotless Peening for Improvement of Fatigue Strength of Carbonized Steel, *International Journal of Fatigue*, 2003, **25**(9-11), 1217-1222.
- [23] Mhaede M., Influence of Surface Treatments on Surface Layer Properties, Fatigue and Corrosion Fatigue Performance of Aa7075 T73, *Materials & Design*, 2012, **41**, 61-66.

- [24] Cho K. T., Song K., Oh S. H., Lee Y.-K., Lim K. M., Lee W. B., Surface Hardening of Aluminum Alloy by Shot Peening Treatment with Zn Based Ball, *Materials Science and Engineering: A*, 2012, **543**, 44-49.
- [25] Kulekci M. K., Esme U., Critical Analysis of Processes and Apparatus for Industrial Surface Peening Technologies, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, **74**(9-12), 1551-1565.
- [26] Trško L., Bokůvka O., Nový F., Guagliano M., Effect of Severe Shot Peening on Ultra-High-Cycle Fatigue of a Low-Alloy Steel, *Materials & Design*, 2014, **57**, 103-113.
- [27] Mitrovic S., Adamovic D., Zivic F., Dzunic D., Pantic M., Friction and Wear Behavior of Shot Peened Surfaces of 36crnimo4 and 36nicrmo16 Alloyed Steels under Dry and Lubricated Contact Conditions, *Applied Surface Science*, 2014, **290**, 223-232.
- [28] Xie L., Jiang C., Lu W., The Influence of Shot Peening on the Surface Properties of (Tib+Tic)/Ti-6al-4v, *Applied Surface Science*, 2013, **280**, 981-988.
- [29] Sun Y., Sliding Wear Behaviour of Surface Mechanical Attrition Treated Aisi 304 Stainless Steel, *Tribology International*, 2013, **57**, 67-75.
- [30] Ganesh B. K. C., Sha W., Ramanaiah N., Krishnaiah A., Effect of Shotpeening on Sliding Wear and Tensile Behavior of Titanium Implant Alloys, *Materials & Design*, 2014, **56**, 480-486.
- [31] Bilyalı Dövme Fotoğrafi, [https:// osk-kiefer.de/en/technology-delivery-program/shot-peening](https://osk-kiefer.de/en/technology-delivery-program/shot-peening), (Ziyaret tarihi: 20.07.2020).
- [32] Schulze V., *Modern Mechanical Surface Treatment*, 1st ed., WILEY-VCH, Weinheim, 2006.
- [33] Gariépy A., Bridier F., Hoseini M., Bocher P., Perron C., Lévesque M., Experimental and Numerical Investigation of Material Heterogeneity in Shot Peened Aluminium Alloy Aa2024-T351, *Surface and Coatings Technology*, 2013, **219**, 15-30.
- [34] Žagar S., Grum J., Surface Modification Analysis after Shot Peening of Aa 7075 in Different States, *Materials Science Forum*, 2013, **768-769**, 519-525.
- [35] Gariépy A., Larose S., Perron C., Bocher P., Lévesque M., On the Effect of the Orientation of Sheet Rolling Direction in Shot Peen Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, **213**(6), 926-938.
- [36] Ziemian C. W., Sharma M. M., Bouffard B. D., Nissley T., Eden T. J., Effect of Substrate Surface Roughening and Cold Spray Coating on the Fatigue Life of Aa2024 Specimens, *Materials & Design*, 2014, **54**, 212-221.



- [37] Sheng X.-f., Xia Q.-x., Cheng X.-q., Lin L.-s., Residual Stress Field Induced by Shot Peening Based on Random-Shots for 7075 Aluminum Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, **22**, s261-s267.
- [38] Ganesh B., Sha W., Ramanaiah N., Krishnaiah A., Effect of Shotpeening on Sliding Wear and Tensile Behavior of Titanium Implant Alloys, *Materials & Design*, 2014, **56**, 480-486.
- [39] Benedetti M., Fontanari V., Bandini M., Savio E., High- and Very High-Cycle Plain Fatigue Resistance of Shot Peened High-Strength Aluminum Alloys: The Role of Surface Morphology, *International Journal of Fatigue*, 2015, **70**, 451-462.
- [40] Ramos R., Ferreira N., Ferreira J. A. M., Capela C., Batista A. C., Improvement in Fatigue Life of Al 7475-T7351 Alloy Specimens by Applying Ultrasonic and Microshot Peening, *International Journal of Fatigue*, 2016, **92**, 87-95.
- [41] Ferreira N., Jesus J. S., Ferreira J. A. M., Capela C., Costa J. M., Batista A. C., Effect of Bead Characteristics on the Fatigue Life of Shot Peened Al 7475-T7351 Specimens, *International Journal of Fatigue*, 2020, **134**, 105521.
- [42] Zupanc U., Grum J., Surface Integrity of Shot Peened Aluminium Alloy 7075-T651, *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **57(5)**, 379-384.
- [43] Trško L., Guagliano M., Bokůvka O., Nový F., Fatigue Life of Aw 7075 Aluminium Alloy after Severe Shot Peening Treatment with Different Intensities, *Procedia Engineering*, 2014, **74**, 246-252.
- [44] Stav O., Kasem H., Akhvlediani R., Hoffman A., Kligerman Y., Etsion I., Simultaneous Shot-Peening of Hard and Soft Particles for Friction Reduction in Reciprocal Sliding, *Tribology International*, 2019, **130**, 19-26.
- [45] Palacios M., Bagherifard S., Guagliano M., Fernández Pariente I., Influence of Severe Shot Peening on Wear Behaviour of an Aluminium Alloy, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2014, **37(7)**, 821-829.
- [46] Pandey V., Singh J. K., Chattopadhyay K., Srinivas N. C. S., Singh V., Optimization of Ussp Duration for Enhanced Corrosion Resistance of Aa7075, *Ultrasonics*, 2019, **91**, 180-192.
- [47] Bagherifard S., Hickey D. J., Fintova S., Pastorek F., Fernandez-Pariente I., Bandini M., Webster T. J., Guagliano M., Effects of Nanofeatures Induced by Severe Shot Peening (Ssp) on Mechanical, Corrosion and Cytocompatibility Properties of Magnesium Alloy Az31, *Acta Biomater*, 2018, **66**, 93-108.
- [48] Wang C., Jiang C., Chen M., Wang L., Liu H., Ji V., Residual Stress and Microstructure Evolution of Shot Peened Ni-Al Bronze at Elevated Temperatures, *Materials Science and Engineering: A*, 2017, **707**, 629-635.

- [49] Ahmed A. A., Mhaede M., Wollmann M., Wagner L., Effect of Micro Shot Peening on the Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Two Microstructure Ti–6al–4v Alloy, *Applied Surface Science*, 2016, **363**, 50-58.
- [50] Sun Y., Sheng G., Gao X., Xu C., Yuan X., The Effect of High Energy Shot Peening on Microstructure and Joining Strength of Tig Welded Az31b Weldment, *Materials Research Express*, 2018, **5**(8), 086516.
- [51] Atieh A. M., Allaf R. M., AlHazaa A., Barghash M., Mubaydin H., Effect of Pre-and Post-Weld Shot Peening on the Mechanical & Tribological Properties of Tig Welded Aluminum 6061-T6 Alloy, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2017, **41**(2), 197-209.
- [52] Hatamleh O., Hill M., Forth S., Garcia D., Fatigue Crack Growth Performance of Peened Friction Stir Welded 2195 Aluminum Alloy Joints at Elevated and Cryogenic Temperatures, *Materials Science and Engineering: A*, 2009, **519**(1-2), 61-69.
- [53] Hatamleh O., The Effects of Laser Peening and Shot Peening on Mechanical Properties in Friction Stir Welded 7075-T7351 Aluminum, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008, **17**(5), 688-694.
- [54] Rodopoulos C. A., Kermanidis A. T., Statnikov E., Vityazev V., Korolkov O., The Effect of Surface Engineering Treatments on the Fatigue Behavior of 2024-T351 Aluminum Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2007, **16**(1), 30-34.
- [55] Hu Y. H., Wu Y. X., Wang G. Y., Guo J. K., Surface Yield Strength Gradient Versus Residual Stress Relaxation of 7075 Aluminum Alloy, *Advanced Materials Research*, 2010, **160-162**, 241-246.
- [56] Guechichi H., Castex L., Fatigue Limits Prediction of Surface Treated Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, **172**(3), 381-387.
- [57] Trško L., Fintová S., Nový F., Bokůvka O., Jambor M., Pastorek F., Florková Z., Oravcová M., Study of Relation between Shot Peening Parameters and Fatigue Fracture Surface Character of an Aw 7075 Aluminium Alloy, *Metals*, 2018, **8**(2), 111.
- [58] Ullah H., Rauf A., Ullah B., Rehan M., Muhammad R., Explicit Dynamics Simulation of Shot Peening Process Induced by Various Types of Shots Impacts, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, **40**(2).
- [59] Benedetti M., Fontanari V., Scardi P., Ricardo C. L. A., Bandini M., Reverse Bending Fatigue of Shot Peened 7075-T651 Aluminium Alloy: The Role of Residual Stress Relaxation, *International Journal of Fatigue*, 2009, **31**(8-9), 1225-1236.

- [60] Sun Q., Han Q., Xu R., Zhao K., Li J., Localized Corrosion Behaviour of Aa7150 after Ultrasonic Shot Peening: Corrosion Depth Vs. Impact Energy, *Corrosion Science*, 2018, **130**, 218-230.
- [61] Oguri K., Fatigue Life Enhancement of Aluminum Alloy for Aircraft by Fine Particle Shot Peening (Fpsp), *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, **211**(8), 1395-1399.
- [62] Žagar S., Grum J., Roughness, Residual Stresses and Pitting Corrosion Effect on Shot Peened Aa 7075, *Tehnički vjesnik*, 2015, **22**(6), 1589-1595.
- [63] Zhang W., Lv S., Yao L., Tong X., Li B., Influence of Shot Peening Intensity on Residual Strength of Aluminium Alloy, *Materials Research Innovations*, 2015, **19**(sup8), S8-541-S548-544.
- [64] Sheng-Li L., Cui Y., Gao X., Srivatsan T. S., Influence of Exposure to Aggressive Environment on Fatigue Behavior of a Shot Peened High Strength Aluminum Alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2013, **574**, 243-252.
- [65] Pandey V., Singh J. K., Chattopadhyay K., Srinivas N. C. S., Singh V., Influence of Ultrasonic Shot Peening on Corrosion Behavior of 7075 Aluminum Alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, **723**, 826-840.
- [66] He J. W., Wang X. M., Ma S. N., Li C. Q., Chen C., Characterization of Surface Strengthening Layer of 7a52 Aluminum Alloy by Supersonic Shot Peening and Its Tribological Prop, *Advanced Materials Research*, 2010, **148-149**, 1177-1181.
- [67] Majzoobi G. H., Azadikhah K., Nemati J., The Effects of Deep Rolling and Shot Peening on Fretting Fatigue Resistance of Aluminum-7075-T6, *Materials Science and Engineering: A*, 2009, **516**(1-2), 235-247.
- [68] Vázquez J., Navarro C., Domínguez J., Experimental Results in Fretting Fatigue with Shot and Laser Peened Al 7075-T651 Specimens, *International Journal of Fatigue*, 2012, **40**, 143-153.
- [69] Mohseni E., Zalnezhad E., Sarhan A. A. D., Bushroa A. R., A Study on Surface Modification of Al7075-T6 Alloy against Fretting Fatigue Phenomenon, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, **2014**, 1-17.
- [70] Hatamleh O., Lyons J. E. D., Forman R., Laser Peening and Shot Peening Effects on Fatigue Life and Surface Roughness of Friction Stir Welded 7075-T7351 Aluminum, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2007, **30**(2), 115-130.
- [71] Gao Y. K., Improvement of Fatigue Property in 7050-T7451 Aluminum Alloy by Laser Peening and Shot Peening, *Materials Science and Engineering: A*, 2011, **528**(10-11), 3823-3828.

- [72] Benedetti M., Fontanari V., Allahkarami M., Hanan J. C., Notch Fatigue Behaviour of Shot Peened High-Strength Aluminium Alloys: Role of the Residual Stress Field Ahead of the Notch Root, 2015, 113-121.
- [73] Luong H., Hill M. R., The Effects of Laser Peening and Shot Peening on High Cycle Fatigue in 7050-T7451 Aluminum Alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2010, **527**(3), 699-707.
- [74] Wagner L., Mhaede M., Wollmann M., Altenberger I., Sano Y., Surface Layer Properties and Fatigue Behavior in Al 7075-T73 and Ti-6Al-4V, *International Journal of Structural Integrity*, 2011, **2**(2), 185-199.
- [75] Peyre P., Merrien P., Lieurade R., Fabbro R., Laser Induced Shock Waves as Surface Treatment for 7075-T7351 Aluminium Alloy, *Surface Engineering*, 1995, **11**(1), 47-52.
- [76] Wu X., Tao N., Hong Y., Xu B., Lu J., Lu K., Microstructure and Evolution of Mechanically-Induced Ultrafine Grain in Surface Layer of Al-Alloy Subjected to Ussp, *Acta Materialia*, 2002, **50**(8), 2075-2084.
- [77] Bianchetti C., Delbergue D., Bocher P., Lévesque M., Brochu M., Analytical Fatigue Life Prediction of Shot Peened Aa 7050-T7451, *International Journal of Fatigue*, 2019, **118**, 271-281.
- [78] Bianchetti C., Lévesque M., Brochu M., Probabilistic Analysis of the Effect of Shot Peening on the High and Low Cycle Fatigue Behaviors of Aa 7050-T7451, *International Journal of Fatigue*, 2018, **111**, 289-298.
- [79] Trško L., Guagliano M., Bokůvka O., Nový F., Jambor M., Florková Z., Influence of Severe Shot Peening on the Surface State and Ultra-High-Cycle Fatigue Behavior of an Aw 7075 Aluminum Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, **26**(6), 2784-2797.
- [80] Sharp P., Clayton J., Clark G., The Fatigue Resistance of Peened 7050-T7451 Aluminium Alloy—Repair and Re-Treatment of a Component Surface, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1994, **17**(3), 243-252.
- [81] Chadwick D. J., Ghanbari S., Bahr D. F., Sangid M. D., Crack Incubation in Shot Peened Aa7050 and Mechanism for Fatigue Enhancement, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2018, **41**(1), 71-83.
- [82] Segurado E., Belzunce F. J., Pariente I. F., Effects of Low Intensity Shot Peening Treatments Applied with Different Types of Shots on the Fatigue Performance of a High-Strength Steel, *Surface and Coatings Technology*, 2018, **340**, 25-35.
- [83] Marini M., Fontanari V., Bandini M., Benedetti M., Surface Layer Modifications of Micro-Shot-Peened Al-7075-T651: Experiments and Stochastic Numerical Simulations, *Surface and Coatings Technology*, 2017, **321**, 265-278.

- [84] Harding M. D., Donaldson I. W., Hexemer R. L., Gharghoury M. A., Bishop D. P., Characterization of the Microstructure, Mechanical Properties, and Shot Peening Response of an Industrially Processed Al–Zn–Mg–Cu Pm Alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, **221**, 31-39.
- [85] Cho K. T., Yoo S., Lim K. M., Kim H. S., Lee W. B., Effect of Si Content on Surface Hardening of Al–Si Alloy by Shot Peening Treatment, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, **509**, S265-S270.
- [86] Guagliano M., Bagheri S., Fernández Pariente I., Ghelichi R., Effects of Severe Air Blast Shot Peening on Microstructure and Residual Stress State of Al Alloys, *Key Engineering Materials*, 2009, **417-418**, 393-396.
- [87] Suh M.-S., Suh C. H., Nahm S.-H., Suh C.-M., Vhcf Properties of A7075-T651 Al Alloy Depending on Shot Peening and Fatigue Testing Methods, *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, **7(1)**, 126848.
- [88] Benedetti M., Fontanari V., Bandini M., Editörler, *Fracture, Fatigue, Failure, and Damage Evolution, Volume 5*, Springer, 127-138, 2015.
- [89] Pandey V., Chattopadhyay K., Santhi Srinivas N. C., Singh V., Role of Ultrasonic Shot Peening on Low Cycle Fatigue Behavior of 7075 Aluminium Alloy, *International Journal of Fatigue*, 2017, **103**, 426-435.
- [90] Kikuchi S., Nakamura Y., Nambu K., Ando M., Effect of Shot Peening Using Ultra-Fine Particles on Fatigue Properties of 5056 Aluminum Alloy under Rotating Bending, *Materials Science and Engineering: A*, 2016, **652**, 279-286.
- [91] Sawada T., Effect of Young's Modulus of Shot Peening Media on Surface Modification Behavior by Micro Shot Peening, *Heat treatment*, 2016, **56(6)**, 452-457.
- [92] Pour-Ali S., Kiani-Rashid A.-R., Babakhani A., Virtanen S., Allieta M., Correlation between the Surface Coverage of Severe Shot Peening and Surface Microstructural Evolutions in Aisi 321: A Tem, Fe-Sem and Gi-Xrd Study, *Surface and Coatings Technology*, 2018, **334**, 461-470.
- [93] Liu Y. G., Li M. Q., Structure Response Characteristics and Surface Nanocrystallization Mechanism of Alpha Phase in Ti-6al-4v Subjected to High Energy Shot Peening, *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, **773**, 860-871.
- [94] Maleki E., Unal O., Amanov A., Novel Experimental Methods for the Determination of the Boundaries between Conventional, Severe and over Shot Peening Processes, *Surfaces and Interfaces*, 2018, **13**, 233-254.
- [95] Chen M., Liu H., Wang L., Wang C., Zhu K., Xu Z., Jiang C., Ji V., Evaluation of the Residual Stress and Microstructure Character in Saf 2507 Duplex Stainless Steel after Multiple Shot Peening Process, *Surface and Coatings Technology*, 2018, **344**, 132-140.

- [96] Wang R., Zhou Q., Zheng Z., Gao Y., The Negative Effect of High-Intensity Shot-Peening on the Intergranular Corrosion Behavior of the Super304h Austenitic Stainless Steel, *Corrosion Science*, 2018, **143**, 390-402.
- [97] Zupanc U., Grum J., Ace Integrity of Shot Peened Aluminium Alloy 7075-T651, *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **57**(05), 379-384.
- [98] Trung P. Q., Khun N. W., Butler D. L., Effects of Shot Peening Pressure, Media Type and Double Shot Peening on the Microstructure, Mechanical and Tribological Properties of Low-Alloy Steel, *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2016, **4**(4), 045001.
- [99] Avcu E., Yildiran Y., Sahin A., Fidan S., Sinmazcelik T., Influences of Particle Impingement Angle and Velocity on Surface Roughness, Erosion Rate, and 3d Surface Morphology of Solid Particle Eroded Ti6al4v Alloy, *Acta Phys. Pol. A*, 2014, **125**(2), 541-543.
- [100] Liu Z. G., Wong T. I., Huang W., Sridhar N., Wang S. J., Effect of Surface Polishing Treatment on the Fatigue Performance of Shot-Peened Ti-6al-4v Alloy, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017, **30**(7), 630-640.
- [101] Hatamleh O., Smith J., Cohen D., Bradley R., Surface Roughness and Friction Coefficient in Peened Friction Stir Welded 2195 Aluminum Alloy, *Applied Surface Science*, 2009, **255**(16), 7414-7426.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Yıldiran Y., **Yetik O.**, Guney M., Iakovakis E., Sınmazçelik T., Avcu. E., Surface, Subsurface and Tribological Properties of Ti6Al4V Alloy Shot Peened under Different Parameters, *Materials*, 2020, **13**(19), 4363.
- [2] Koçoğlu H., Avcu Y., **Yetik O.**, Avcu E., Surface Properties of Titanium Alloys Grit Blasted at Various Particle Impingement Angles, *Materials Today: Proceeding*, 2020, **32**(1), 18-26.
- [3] **Yetik O.**, Koçoğlu H., Avcu Y., Avcu E., The Effects of Grit Size and Blasting Pressure on the Surface Properties of Grit Blasted Ti6Al4V Alloy, *Materials Today: Proceeding*, 2020, **32**(1), 27-36.
- [4] Avcu Y.Y., **Yetik O.**, Guney M., Sınmazçelik T., Avcu E., Modification of Surface Properties of Shot Peened Ti6Al4V Alloy by Grit Blasting, *International Marmara Sciences Congress*, Kocaeli, Türkiye, 19-20 Haziran 2020.
- [5] Gönül B., **Yetik O.**, Yıldiran Avcu Y., Sönmez F., Güney M., Avcu E., Effect of Shot Peening Parameters on Surface Morphology of AA1050 Aluminum Alloy, *International Marmara Sciences Congress*, Kocaeli, Türkiye, 19-20 Haziran 2020.
- [6] Gönül B., **Yetik O.**, Yıldiran Avcu Y., Sönmez F., Güney M., Avcu E., Investigation of Sub-Surface Properties of Shot Peened AA1050 Alloy, *International Marmara Sciences Congress*, Kocaeli, Türkiye, 19-20 Haziran 2020.
- [7] Avcu Y.Y., **Yetik O.**, Lakovakis E., Guney M., Avcu E, Sub-Surface Microstructural and Mechanical Properties of Ti6Al4V Alloy Shot Peened Under Different Parameters, *International Marmara Sciences Congress*, Kocaeli, Türkiye, 01-03 Kasım 2019.
- [8] Avcu Y.Y., **Yetik O.**, Lakovakis E., Guney M., Avcu E., Adhesive Wear Behavior of Ti6Al4V Alloy Shot Peened Under Different Parameters, *International Marmara Sciences Congress*, Kocaeli, Türkiye, 01-03 Kasım 2019.
- [9] Gonul B., **Yetik O.**, Cubuk A.B., Avcu Y.Y., Kocoglu H., Avcu E., The Effect of Glass Beads on The Shot Peening Properties of AA7075 Al Alloy, *International Marmara Sciences Congress*, Kocaeli, Türkiye, 01-03 Kasım 2019.

- [10] Gonul B., **Yetik O.**, Cubuk A.B., Avcu Y.Y., Kocoglu H., Avcu E., The Effect of Shot Size and Shot Impingement Angle on The Weight Loss and Surface Roughness of Shot Peened AA7075 Aluminium Alloy, *International Marmara Sciences Congress*, Kocaeli, Türkiye, 01-03 Kasım 2019.
- [11] Avcu Y.Y., **Yetik O.**, Koçoğlu H., Avcu E., Sınmazçelik T., Dry Sliding Wear Behaviour of Shot Peened Ti6Al4V Alloys at Different Peening Times, *Acta Physica Polonica, A.*, 2018, **134**, 349-353.
- [12] Avcu Y.Y., **Yetik O.**, Koçoğlu H., Avcu E., Sınmazçelik T., Dry Sliding Wear Behaviour of Shot Peened Ti6Al4V Alloys at Different Peening Times, *7th International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Muğla, Türkiye, 22-26 Nisan 2017.
- [13] Avcu E., Avcu Y.Y., **Yetik O.**, Koçoğlu H., Sınmazçelik T., Definition and Investigation of Plastic Deformation Rate During Solid Particle Erosion of Ti6Al4V Alloy Under Normal Impingement Angle, *7th International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Muğla, Türkiye, 22-26 Nisan 2017.
- [14] **Yetik O.**, Koçoğlu H., Avcu Y. Y., Avcu E., Sınmazçelik T., The Effects of Grit Size and Blasting Pressure on The Surface Properties of The Girt Blasted Ti6Al4V Alloy, *7th International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Muğla, Türkiye, 22-26 Nisan 2017.
- [15] Koçoğlu H., Avcu Y.Y., **Yetik O.**, Avcu E., Sınmazçelik T., Surface Properties of Titanium Alloys Grit Blasted at Various Particle Impingement Angles, *7th International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Muğla, Türkiye, 22-26 Nisan 2017.
- [16] **Yetik O.**, Yildiran Y., Yavuzyeğit B., Avcu E., Effects of Erodent Particle Size and Acceleration Pressure on The Surface Topography of Ti6Al4V Alloy in Microblasting Process, *16th International Materials Symposium (IMSP'2016)*, Denizli, Türkiye, 12-14 Ekim 2016.
- [17] **Yetik O.**, Yavuzyeğit B., Yildiran Y., Pekkan G., Sarıdağ S., Avcu E., Effects of Particle Impingement Angle and Acceleration Pressure on The 3D Surface Topography of Monolithic Zirconia, *16th International Materials Symposium (IMSP'2016)*, Denizli, Türkiye, 12-14 Ekim 2016.
- [18] Yildiran Y., **Yetik O.**, Yavuzyeğit B., Avcu E., Effects of Shot Peening Parameters on The Surface Properties of Ti6Al4V Alloy, *16th International Materials Symposium (IMSP'2016)*, Denizli, Türkiye, 12-14 Ekim 2016.
- [19] Yavuzyeğit B., **Yetik O.**, Yildiran Y., Pekkan G., Sarıdağ S., Avcu E., The Effects of Erodent Particle Size and Acceleration Pressure on The 3D Surface Topography and Surface Properties of Conventional Zirconia, *16th International Materials Symposium (IMSP'2016)*, Denizli, Türkiye, 12-14 Ekim 2016.



## ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Antalya’da tamamladı. 2016 yılında Kocaeli Üniveritesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. 2017 yılında kazandığı YLSY bursu kapsamında Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK) adına 2019 yılından beri Manchester Üniversitesin’de Korozyon Kontrol Mühendisliği alanında lisansüstü eğitimini sürdürmektedir.

